

1

НАУКА-

образованию,
производству,
экономике

Материалы
международной
научно-технической
конференции



**Министерство образования Республики Беларусь
Белорусский национальный технический университет**

**Наука — образованию,
производству,
экономике**

**Материалы международной
научно-технической конференции**

Том 1

**Минск
УП «Технопринт»
2003**

УДК 001:[37+658+338](063)

ББК 72я431

Н 34

Рецензенты:

Филонов И. П., д.т.н., проф., Кукуй Д. М., д.т.н., проф., Ковалевский В.Н., д.т.н., проф., Зуйков И. Е., д.ф.-м. н., проф., Киселев М. Г., д.т.н., проф., Цветков В. Д., д.т.н., проф., Руктешель О. С., д.т.н., проф., Седюкевич В. Н., к.т.н., доц., Есьман Р. И., д.т.н., проф., Доманевский Д.С., д.ф.-м. н., проф., Микулик Н. А., д. т. н., проф.

Н 34 **Наука** — образованию, производству, экономике. Материалы международной научно-технической конференции. Т.1/Под общей редакцией д.т.н., проф. Хрусталева Б.М., д. т. н., проф. Соломахо В.Л. —Мн.: УП «Технопринт», 2003 —413 с.

ISBN 985-464-491-X

ISBN 985-464-492-8

УДК 001:[37+658+338](063)

ББК 72я431

ISBN 985-464-491-X
ISBN 985-464-492-8

© БНТУ, 2003
© Оформление
УП «Технопринт», 2003

МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.01

АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОФИЛЯ ДИСКОВОЙ ФАСОННОЙ ФРЕЗЫ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ВИНТОВЫХ КАНАВОК НА ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ИНСТРУМЕНТАХ

Фирсов А.С., Мисевич В.С.

*Витебский государственный технологический университет
Витебск, Беларусь*

Важнейшими операциями при производстве цилиндрических инструментов, имеющих винтовые канавки, являются фрезерование или шлифование этих канавок. При этом инструмент (фреза или шлифовальный круг) имеет сложную фасонную форму, не совпадающую с формой стружечной канавки в нормальном сечении. Определение этой формы является одной из сложных задач профилирования фасонных поверхностей. Для определения формы инструмента для обработки винтовых стружечных канавок на цилиндрических инструментах применяют графические, графоаналитические [1] или аналитические [2] методы расчета. Однако, в связи с повсеместным внедрением вычислительной техники, эти методы не могут конкурировать с численными и алгоритмическими методами, позволяющими без особых трудностей переводить расчеты на язык, понятный для ЭВМ.

На основе численного метода нами разработан алгоритм определения профиля дисковой фасонной фрезы для обработки винтовых стружечных канавок криволинейного профиля на цилиндрических поверхностях. Этот алгоритм представим в виде отдельных шагов (процедур).

1. Исходные данные выбираются независимо от метода профилирования дисковой фасонной фрезы по известным формулам и процедурам [2]. Поэтому следующие параметры будем считать известными:

- H — шаг винтовой стружечной канавки;
- a — межосевое расстояние;
- θ — начальный угол поворота системы координат винтовой канавки $O_{cr}X_{cr}Y_{cr}$, рис. 1;
- τ — угол скрещивания осей фрезы и цилиндрического инструмента;
- C_{ϕ} — половина ширины фрезы;
- Δu — дискрета задания шага вспомогательных сечений профиля фрезы,
- $\Delta \chi$ — дискрета варьирования углов χ ;
- ε — принятая погрешность определения значений углов χ ;
- n — количество точек, задающих профиль стружечной канавки;

- m — количество секущих плоскостей, определяющих профиль дисковой фасонной фрезы;
- $mas[r_p, \varphi_{Ti}]$ — массив (таблица) значений полярных координат точек профиля винтовой стружечной канавки в торцевом сечении цилиндрического инструмента.

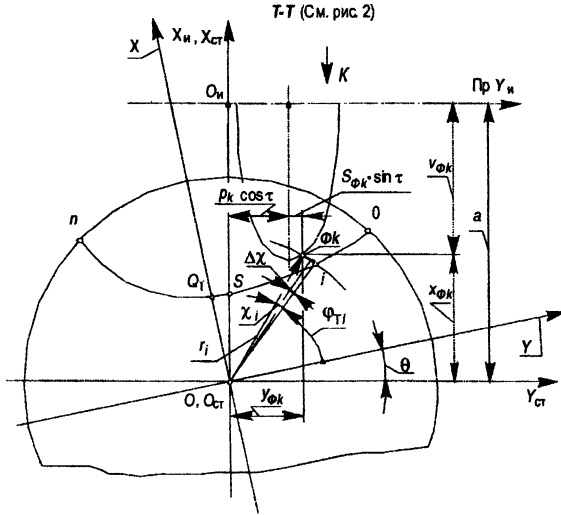


Рис.1. Схема расчета координат точки пересечения секущей плоскости и винтовой линии в системе координат $O_{cm} X_{cm} Y_{cm}$

2. Принимаются начальные значения переменных величин

$$i := 0; \quad k := 0; \quad R_o := a.$$

3. Производится расчет углов χ_p , см. рис. 1 и рис. 2:

1) принимается начальное значение χ_0 , $\chi_0 := 0,001$;

2) присваивается новое значение углу χ , $\chi := \chi_0$;

3) определяется значение угла χ , $\chi := \chi + \Delta\chi$;

4) рассчитывается значение величины A ,

$$A := r_i \cdot \cos(\varphi_{Ti} + \theta + \chi),$$

1) рассчитывается значение величины B ,

$$B := \frac{C_\phi - \Delta u \cdot k}{\cos \tau} - H \cdot \frac{\chi}{2\pi} \cdot \operatorname{tg} \tau,$$

2) рассчитывается значение величины C , $|A - B| := C$

3) проверяются условия

- если $C \leq \varepsilon$, то выполняется п. 8), шаг 3,
- если $C > \varepsilon$, то расчет повторяется, начиная с п. 3), шаг 3;
- 4) принимается значение

$$\chi_i := \chi.$$

Вид К

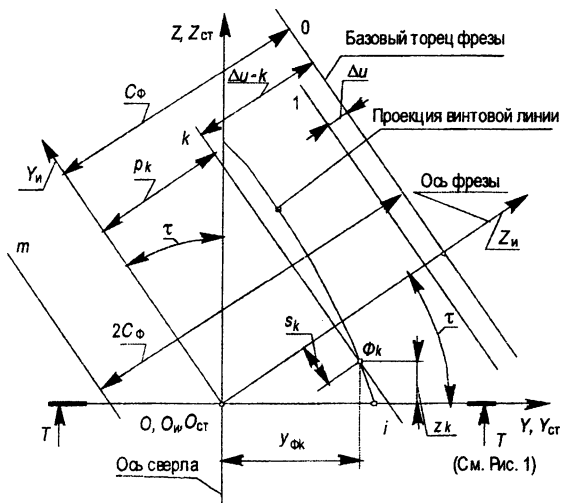


Рис. 2. Схема расчета координат точки пересечения секущей плоскости и винтовой линии в системе координат $O_{cm} X_{cm} Z_{cm}$

4. Производится расчет полярных координат точки Φ_k в системе координат XOY . Точка Φ_k — это точка пересечения винтовой линии, проходящей через точку i профиля стружечной канавки, и k -ой секущей плоскости искомого профиля фрезы, см. рис. 1:

$$r_{\Phi k} := r_i; \varphi_{\Phi k} := \varphi_{Ti} + \theta + \chi_i.$$

5. Производится расчет декартовых координат точек Φ_k в системе координат XOY

$$x_{\Phi k} := r_i \cdot \sin \varphi_{\Phi k};$$

$$y_{\Phi k} := r_i \cdot \cos \varphi_{\Phi k}.$$

6. Производится расчет координат точек Φ_k в системе координат инструмента $X''_и O''_и Y''_и$

$$s_{\Phi k} := \frac{v_{\Phi k} := a - x_{\Phi k} \quad y_{\Phi k} - (C_\phi - \Delta u \cdot k) \cdot \cos \tau}{\sin \tau}$$

7. Производится расчет радиус-векторов $R_{\phi k}$ в k -ом сечении профиля фрезы

$$R_{\phi k} := \sqrt{u_{\phi k}^2 + s_{\phi k}^2}$$

8. Производится расчет координат точек профиля фрезы:

1) проверяется условие

$$R_{\phi k} < R_{\phi}$$

если условие выполняется, то значению искомого радиуса фрезы R_{ϕ} присваивается значение

$$R_{\phi} := R_{\phi k}$$

если условие не выполняется, то значению искомого радиуса фрезы R_{ϕ} присваивается значение

$$R_{\phi} := R_{\phi}$$

- 1) принимается новое значение k_{ϕ} , $k_{\phi} := k$;
- 2) определяется новое значение i , $i := i + 1$;
- 3) проверяется условие

$$i = n;$$

если условие выполняется, то расчет повторяется, начиная с шага 3°,

если условие не выполняется, то производится расчет положения плоскости $U_{\phi k}$

$$p_{\phi} := C_{\phi} - Du \cdot k_{\phi};$$

- 1) определяется новое значение k , $k := k + 1$;
- 2) проверяется условие

$$k = m,$$

если условие не выполняется, то расчет повторяется, начиная с шага 3с,

если условие выполняется, то расчет значений координат точек профиля фрезы заканчивается.

Вычисленные значения координат точек профиля дисковой фасонной фрезы заносятся в соответствующие ячейки таблицы 1

Номер секущей плоскости k_{ϕ}	Положение секущей плоскости p_{ϕ}	Радиус окружности фрезы в секущей плоскости $U_{\phi k}$
0	p_0	$R_{\phi 0}$
1	p_1	$R_{\phi 1}$
...
m	p_m	$R_{\phi m}$

Таким образом, в системе координат связанной с осью и базовым торцом фрезы профиль фрезы задается координатами p_k и $R_{\phi k}$. Шаг варьирования аргумента p_k равен $\Delta u = 0,5$ мм. Погрешность вычисления функции $R_{\phi k}$ равная $\Delta R_{\phi k}$ не превышает 1/3 допуска на профиль стружечной канавки.

При определенных условиях приведенный алгоритм может быть распространен на случаи профилирования дисковых фасонных фрез для обработки винтовых стружечных канавок на конических и сферических инструментах.

Литература

1. Семенченко В.М., Матюшин В.М., Сахаров Г.Н. Проектирование металлорежущих инструментов / Под ред. И.И. Семенченко. — М.: Машгиз, 1962. — 952 с.: ил.
2. Лашнев С.И., Юликов М.И. Расчет и конструирование металлорежущих инструментов с применением ЭВМ. — М.: Машиностроение, 1975. — 392 с.

УДК 658.512

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕГЛАМЕНТЫ ОБРАБОТКИ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ МОДУЛЕЙ КОРПУСНЫХ ДЕТАЛЕЙ

Беляков Н.В., Махаринский Е.И.

*Витебский государственный технологический университет
Витебск, Беларусь*

Цель исследования — формализация процесса определения вариантов маршрута обработки функциональных модулей при проектировании технологического процесса механической обработки корпусных деталей машин.

Функциональный модуль (ФМ) — совокупность поверхностей, выполняющих определенную функцию. Ранее были разработаны принципы классификации (по служебному назначению и уровню иерархии) и классификаторы ФМ корпусных деталей машин, применяемых на машиностроительных предприятиях Витебской области [1].

В процессе механической обработки деталей машин изменение состояния ФМ детали от исходного до конечного, как правило, осуществляется за несколько технологических переходов, по мере выполнения которых постепенно повышаются показатели его качества. На основе анализа работы тех-

нологических бюро машиностроительных предприятий и анализа литературных источников установлено, что существует два метода определения маршрутов обработки ФМ:

- 1) с помощью синтеза возможных вариантов маршрута на основе моделирования состояния показателей его качества;
- 2) с помощью стандартных маршрутов, применяемых на том или ином предприятии.

Для реализации первого метода разработан алгоритм и программа на языке DELPHI 5.0 для автоматического синтеза всех возможных вариантов маршрутов обработки для любых ФМ.

Исходными данными для расчета являются: классификатор переходов механической обработки деталей, классификатор ФМ нулевого ранга, таблицы соответствия кода поверхности набору кодов переходов, таблица уточненных переходов. С помощью иерархического классификатора ФМ формируется шестизначный код ФМ нулевого ранга (Рис. 1). Здесь 221212 – ФМ нулевого ранга, вращения, функциональный, элементарный, цилиндр, открытый, внутренний. Пусть для него IT=7, HRC=30, D=25 мм., P=43 мм.

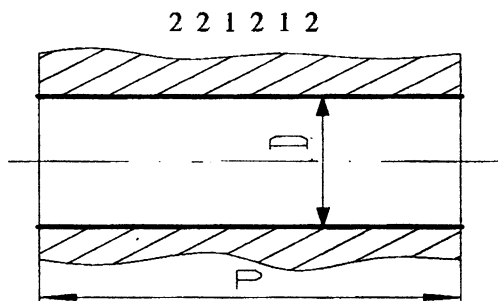


Рис. 1. ФМ нулевого ранга

С помощью таблицы соответствия (Табл. 1) выбираются коды переходов, соответствующие сформированному коду компонента.

Из таблицы уточненных переходов (в ней указывается уточненный код перехода в зависимости от диапазона изменения качества точности при предварительной; чистовой, отделочный и однократной обработке) в соответствии с отобранными кодами, отбираются те уточненные коды переходов, которые обеспечивают уровень точности равный или более низкий, чем заданный условиями задачи.

Результаты этого шага заносятся в таблицу первого уровня (Табл. 2).

Квалитет точности конечного состояния сравнивается последовательно в каждой строке этой таблицы с диапазоном квалитетов точности на «выходе» перехода.

Таблица 1

Коды						Переходы
1	2	1	1	1	0	005, 030, 031, 040, 041, 050, 060, 061
1	2	2	1	1	0	032, 033, 041, 042, 050, 060, 062, 063
2	2	1	2	1	2	003, 010, 011, 012, 020, 021, 022, 023, 060, 070
...

Здесь 003 — растачивание продольное, 020 — сверление, 021 — рас-
сверливание, 023 — развертывание и т. д.

Таблица 2

Таблица 3

	На входе	На выходе
0034	20...16	11...9
0031	20...16	13...11
0032	13...11	10...8
0033	10...8	7...5
0104	20...16	11...9
0101	20...16	14...12
0102	14...12	10...9
0103	10...9	8...6
0234	20...16	12...9
0231	12...10	10...9
0232	10...9	8...7
0233	8...7	6...5
...

Выход	Код перехода	Вход
7...5	0033	10...8
6...8	0103	10...9
8...7	0232	10...9
...

В зависимости от граничных условий либо осуществляется переход к следующей строке таблицы первого уровня без записи, либо из заданной строки выписываются в столбец «вход» новой таблицы (второго уровня) соответствующее значение квалитета точности (Табл. 3) столбца «выход» данной таблицы первого уровня, а также соответствующий код перехода и т. д.

Совокупность таблиц второго, третьего и более высоких уровней (Табл. 4–5) позволяет сформировать искомую совокупность маршрутов обработки типовых ФМ.

Программа позволяет оптимизировать маршрут обработки для ФМ любого ранга сложности (после его кодировки) по критериям предпочтения (однородность обработки, основное время обработки, число переходов).

Таблица 4

Таблица 5

Выход	Код перехода	Вход
11...9	0034	16...20
10...8	0032	11...13
11...9	0104	16...20
10...9	0102	12...14
12...9	0234	16...20
10...9	0231	12...10
...

Выход	Код перехода	Вход
13...11	0031	16...20
14...12	0101	16...20
...

Для формализации назначения маршрута по второму методу предлагается ввести понятие технологического регламента (ТР) — совокупности упорядоченной технологической информации о ФМ. В таблице 7 приводится структура технологического регламента.

Таблица 7

N перехода	Код функционального модуля и технологического регламента				
1	N1	AB1	H1	J1	K1
2	N2	AB2	H2	J2	K2
...
n-1	Nn-1	ABn-1	Hn-1	Jn-1	Kn-1
n	Nn	ABn	Hn	Jn	Kn

где N — номер обрабатываемой поверхности; AB — набор кодов характеризующих наименование перехода (A — код наименования перехода, B — код вида перехода и его точности); H — код вида режущего инструмента и его размерной характеристики); J — код фрагмента управляющей программы для станков с числовым программным управлением; K — код распределения перехода в этап типовой схемы изготовления корпусной детали.

Разработаны классификаторы технологических регламентов обработки комплексных функциональных модулей, применяемых на станкостроительных

предприятиях Витебской области. Под комплексным ФМ понимается функциональный модуль наибольшей сложности и наивысших показателей качества и точности. Из такого ФМ методом адресации можно получить частный модуль, заданный чертежом. Этим же методом из соответствующего комплексного ТР можно получить технологический регламент для заданного ФМ.

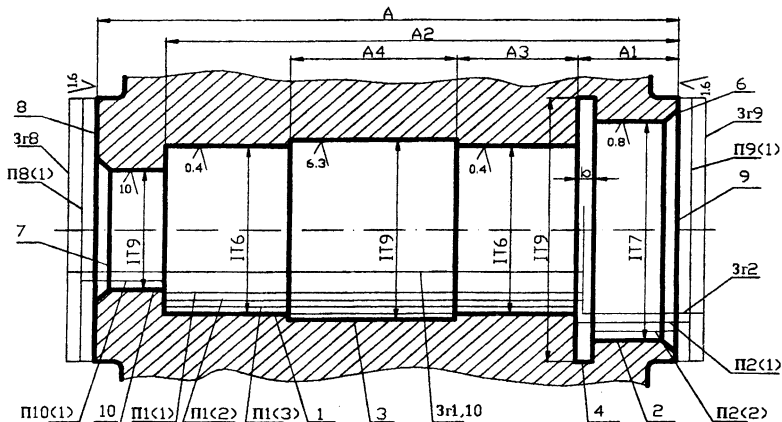


Рис. 2. ФМ образующий вспомогательную сборочную базу и схема снятия припуска. Зг — заготовка, П_i(j) — j-ый припуск, i-ой поверхности

Таблица 8

n	N _i	AB _i	H _i	j _i	K _i
1	П8(1)	0301	0510	-	1
2	П9(1)	0051(0301)	0105(0510)	-	1
3	П1(1)	0101(0031)	0116(0109)	-	1
4	П10(1)	0101(0031)	0115(0109)	-	1
5	8	0302	0510	-	9
6	10	0102(0032)	0115(0109)	-	9
7	9	0052(0302)	0105(0510)	-	9
8	П1(2)	0102(0032)	0116(0109)	-	9
...

Так, например, ФМ представленный на рис. 2 и соответствующий ТР (элементы которого представлены в таблице 8) легко можно использовать для заданных ФМ представленных на рис. 3 и получить технологические регламенты их обработки, отбросив ненужные переходы из комплексного технологического регламента.

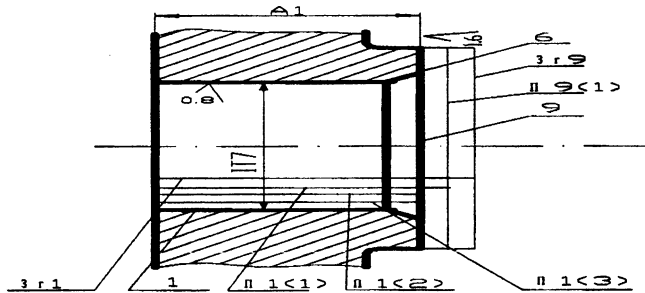


Рис. 3. Частные случаи комплексного ФМ

Литература

Беляков Н.В., Махаринский Е.И. Формализация проектирования схемы базирования заготовок корпусных деталей машин // *Машиностроение: Сб. научн. трудов. Вып. 17. Под ред. И.П. Филонова.* – Мн.: УП «Технопринт», 2001. – с.97-101.

Махаринский Е.И., Горохов В.А. *Основы технологии машиностроения: Учебник.* Мн.: Выш. шк., 1997. -423с.

УДК 621.01

СИСТЕМНЫЕ ФАКТОРЫ ГЕНЕРАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МЕТОДОВ И ИХ КЛАССИФИКАЦИЯ

Гришаев А.Н., Мисевич В.С.

*Витебский государственный технологический университет
Витебск, Беларусь*

Современное развитие технологии изготовления деталей характеризуется применением новых методов формообразования, оказывающихся эффективными для отдельных типов деталей. Эти методы весьма различны по своей физической природе, поэтому трудно представить их классификацию, включающую все возможные варианты на основе только физической сущности метода. Однако потребность в общей классификации методов, включая их полный систематизированный перечень, существует, так как наличие классификации такого уровня позволит формализовать выбор метода и предсказать появление новых методов.

Каждый технологический метод может быть описан в конкретно физической форме, с указанием всех параметров процесса обработки и параметров, определяющих условия его протекания. Эта форма описания метода позволяет спроектировать процесс для его выполнения, но мало пригодна для общей классификации технологических методов, так как учитывает много частей.

Кроме того, каждый метод может быть описан на системном уровне, на котором абстрагируются от конкретных параметров процесса. Это позволяет находить общее у различных методов, отличающихся физическими параметрами, и проводить их классификацию.

Общепринято системное представление технологической системы в виде «черного ящика», т.е. «системы неизвестной структуры, на вход которой поступают материя, энергия и информация» [1], а на выходе получается деталь или полуфабрикат, а также отходы. Однако для целей общей классификации методов «черный ящик» не подходит, так как несет для этого слишком мало информации. Для этих целей больше подходит модель технологической системы в виде «серого ящика», рис. 1, в котором намечена первоначальная структура, включающая кондиционер, креатор и воздействие [2].

Кондиционер — это совокупность устройств, обеспечивающих условия протекания процесса изготовления детали. *Креатор* — это совокупность устройств (сервопривод, суппорт и инструмент), непосредственно формирующих геометрию детали. Например, для горячей объемной штамповки конди-

циатором будет совокупность устройств, обеспечивающих нагрев заготовки, а креатором — устройств, обеспечивающих ударное воздействие специальным инструментом — штампом. *Воздействие* — это процесс преобразования исходного материала в деталь с помощью потока энергии под управлением потока информации. В «сером ящике» в процессе воздействия происходит соединение информации, энергии и материала. Например, если производится ручная обработка на токарном станке, то соединяется геометрическая информация, вносимая человеком с энергией идущей от привода станка и с материалом заготовки. Все это объединяется в процессе точения, дающем геометрию детали. Если используется сервопривод, то информация и энергия предварительно соединяются в кондиционаторе (сервопривод) и в связанном виде подаются в процесс обработки (воздействие). Это приводит к качественно новому результату, возможности обработки фасонных деталей.

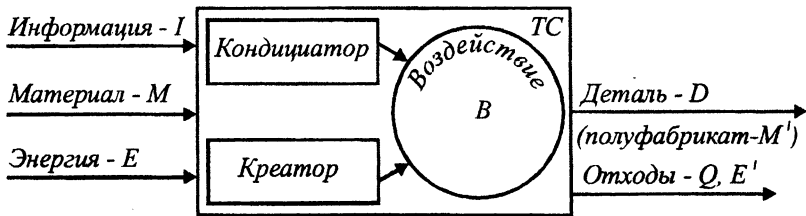


Рис. 1. Системная модель технологической системы (ТС) в виде «серого ящика»

Использование «серого ящика» позволяет ввести следующие различия для технологических методов.

- Характер воздействия и его физическая суть (разрушение пластичное, деформирование пластическое, гравитационное и т.д.).
- Что имеет определяющее значение: кондиционатор или креатор. Например, для лезвийного резания определяющее значение, как правило, имеет креатор, а для свободного литья — кондиционатор.
- Методы подачи энергии, материала, информации — раздельно или в комбинациях. В таблице 1 приведены возможные сочетания информации, энергии и материала до поступления в процесс воздействия.
- Различия информации о структуре материала (например, в порошковой металлургии — состав и свойства порошков), о геометрической форме материала (например, профиль проката).
- Способ подачи информации — непосредственно (например, неавтоматизированный процесс с ручным управлением) или через посредник (например, точение фасонных деталей фасонными резцами). Посредники могут быть

твердые (фасонный резец, пресс-форма) и нетвердые (сформированный поток жидкости, порошки, жидкость и т.д.).

Таблица 1

Наименование	Обозначение	Сочетание	Пример
Информация	I	-	Радио, TV, ЭВМ
Энергия	E	-	Электростанции, ЛЭП
Материал	M	-	Шахты, обогатительные фабрики и т.д.
Энирмация	IE	Информация Энергия	Следящие приводы в станках с ЧПУ и других технологических машинах
Информат	IM	Информация Материал	Программоносители в ТС, детали
Энермат	EM	Энергия Материал	Бензин, сжатый воздух. Не характерен для ТС
Креация	IEM	Информация Энергия Материал	Работа некоторых ТС, в которых, например, по определенным координатам осаждаются расплавленные капли.

Сочетание факторов описанных в п. 4 в значительной степени определяет метод формообразования. На рис. 2 и рис. 3 показаны для примера два «серых ящика» с различной комбинацией факторов. При этом анализ факторов генерации метода формообразования проводился по схеме включающей следующие элементы: схема обработки с указанием потоков информации (см. рис. 2а, 3а), энергии и материала; модель технологической системы в виде «серого ящика» (см. рис. 2б, 3б); уравнение потоков информации, энергии и материала (1, 2).

$$B = (I_{\text{геометр.}} + M_{\text{инструм.}}) + E_{\text{механич.}} + (M_{\text{дет.}} + E_{\text{тепл.}}), \quad (1)$$

$$B = (I_{\text{геометр.}} + E_{\text{механич.}}) + E_{\text{механич.}} + M_{\text{дет.}}, \quad (2)$$

Анализ показывает, что комбинация всех таких факторов дает около тридцати методов формообразования, при этом не возникает дублирования и нарушения однозначности.

Ранее нами была составлена систематика методов на основе их конкретного физического содержания [2]. Сопоставление конкретной физической систематики и классификации на основе «серого ящика», показывает, что они дополняют друг друга.

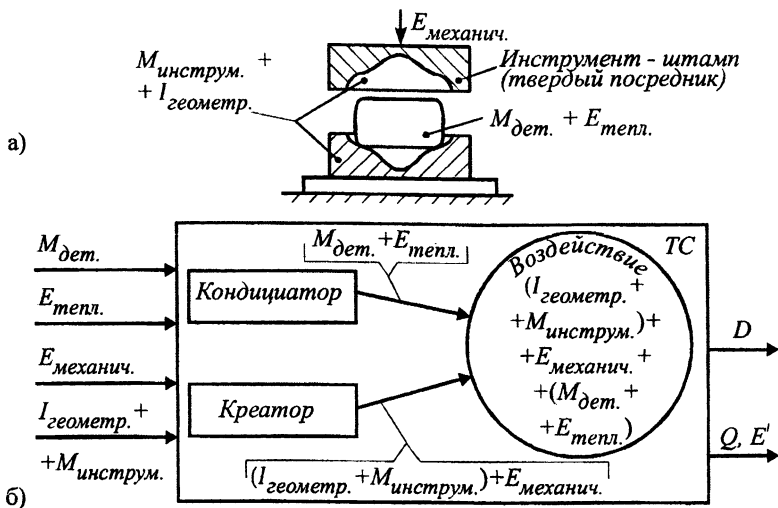


Рис. 2. Схема анализа факторов генерации метода формообразования — горячая объемная штамповка

Таким образом, созданная общая классификация технологических методов на системном уровне вместе с конкретно физической систематикой позволяет рассмотреть все возможные методы, формализовать и автоматизировать с применением ЭВМ выбор метода формообразования по необходимым свойствам (точность, первичность синтеза формы детали, производительность и т.д.).

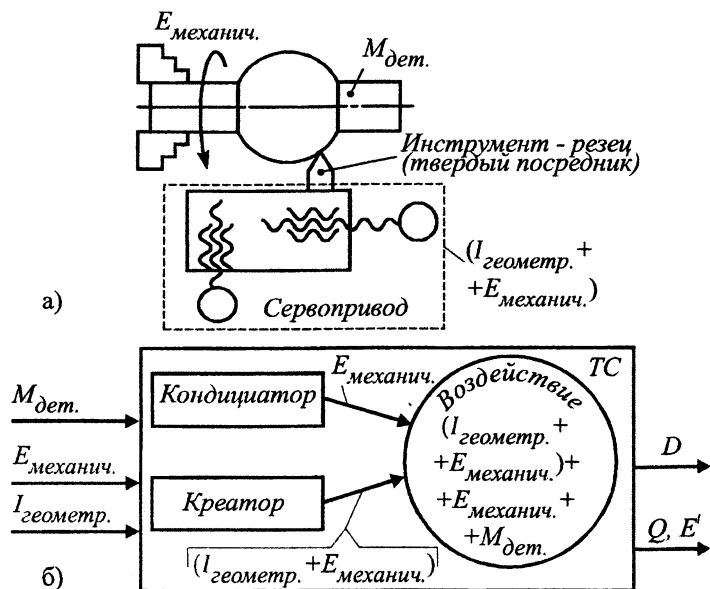


Рис. 3. Схема анализа факторов генерации метода формообразования — лезвийное резание (на примере точения на станках с ЧПУ)

Литература

1. Смирнов А.И. Анализ перспектив развития методов формообразования в машиностроении. Обзор. — М., НИИмаш, 1982, — 49 с.
2. Исследование обобщенных параметров процесса деталиобразования и разработки гибкого оборудования, работающего на новых принципах: Отчет о НИР ГБ-97-241 (заключительный) / ВГТУ; Рук. В.С. Мисевич; № ГР19971227. — Витебск, 1998. — 119 с: рис. — Спис. лит.

УДК 621.01

ФОРМАЛИЗОВАННЫЙ ВЫБОР ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МЕТОДОВ**Климентьев А.Л. , Мисевич В.С.***Витебский государственный технологический университет**Витебск, Беларусь*

Современное производство характеризуется ускоренной сменяемостью продукции, а также переходом к мелкосерийному и единичному производству, что обуславливает требование по сокращению сроков технологической подготовки производства (ТПП). Соблюдение этого требования, с учетом большого числа разнообразных технологических методов, возможно лишь при условии комплексной автоматизации ТПП.

Для обеспечения комплексной автоматизации ТПП, помимо прочего, необходимо обеспечить формальный выбор технологического метода и формализованную разработку технологической схемы.

Исходя из общих положений системотехники, в процессе проектирования ТП можно выделить два уровня: уровень макропроектирования и уровень микропроектирования. Именно к уровню макропроектирования ТП относятся выбор технологического метода и разработка технологической схемы. К уровню же микропроектирования ТП относится разработка технологического маршрута и операций. Рассматриваемый здесь формализованный выбор технологических методов является составной частью макропроектирования ТП. [1]

Выбор технологического метода для конкретного изделия или детали (далее просто детали) должен быть основан на обеспечении требуемого качества этой детали, которое характеризуется некоторой совокупностью ее свойств.

Совокупность свойств деталей, согласно одному из принципов квалиметрии, является совокупностью, упорядоченной в виде многоуровневой иерархической структуры — дерева свойств. Важнейшим свойством детали является ее приспособленность к функционированию — функциональность, при этом функциональность может проявляться на разных периодах жизненного цикла детали: при подготовке к использованию и при непосредственном использовании. Кроме того, в каждом из этих периодов функциональность проявляется в двух аспектах: во-первых, в аспекте основной функции детали, характеризующей приспособленность детали выполнять свое основное назначение в соответствующий период жизненного цикла, во-вторых, в аспекте вспомогательной функции, характеризующей приспособленность к взаимодействию в системе «человек–среда–объект». [2]

Для ТПП функциональность и свойства детали должны рассматриваться в период ее непосредственного использования

Проведенный анализ массива деталей различного функционального назначения позволил выявить их основные свойства. Свойства, определяющие функциональность детали, могут быть представлены в виде дерева свойств в табличной форме.

Свойства, определяющие функциональность детали

Функциональность	Основная функция	Приспособленность к выполнению основного назначения (свойства назначения)	
	Вспомогательная функция	Жизнеобеспеченность	
		Экологичность	Экологичность техническая
			Экологичность биологическая
		Безизъянность	Средоустойчивость
Человекоустойчивость			

Примечание: в данном фрагменте приведены лишь часть дерева свойств, определяющих функциональность

Формализация выбора технологических методов основана на следующей схеме. В результате анализа назначения детали и выполняемых ею функций определяется совокупность свойств детали, определяющих ее функциональность (что может быть сделано на основе разработанных совокупностей свойств для различных групп деталей). Свойства детали характеризуются определенными показателями с установленными численными значениями. Требуемые свойства детали обеспечиваются рядом факторов, которые разделены на две группы: определяющие (материал детали и ее геометрическая форма) и дополняющие (качество поверхности, масса и др.).

Указанные факторы сопоставлены конкретным технологическим методам посредством выделения квалификационных групп по каждому из факторов в результате их квантификации и сопоставления этим группам определенных технологических методов. Это сопоставление основано на анализе технологических возможностей различных методов и реализуется в табличной форме путем составления матриц соответствия по каждому из факторов выбора.

Выбор технологического метода осуществляется путем составления сводной таблицы, в которую заносятся соответствующие значения весовых коэффициентов из матриц соответствия для каждого из технологических методов. Технологический метод, получивший в итоге максимальное число баллов, является рекомендуемым для дальнейшего проектирования ТП.

Таким образом, выбор технологического метода по матрицам соответствия является в достаточной степени формальным и может быть достаточно легко автоматизирован.

Итак, общая идеология связи деталей и технологических методов выражается следующей схемой: детали — функции — свойства — факторы — технологические методы. [3, 4]

Пробное практическое применение методики формализованного выбора технологических методов показывает, что выбор технологического метода на основе использования матриц соответствия нередко неоднозначен, что может быть преодолено следующими путями: составлением матриц соответствия для технологических способов, совершенствованием квантификации факторов на квалификационные группы, уточнением весовых коэффициентов каждого из факторов. Кроме того, при выборе конкретного технологического метода должны учитываться особенности конкретного производства (наличие соответствующих производственных площадей, существующий парк производственного оборудования и пр.).

Анализ большого массива изделий и деталей широкой номенклатуры и ТП их изготовления показывает, что значительная часть изделия и деталей не имеют высоких требований по своим свойствам и допускает вариабельность технологических методов своего изготовления. [5] Матрицы соответствия, используемые для выбора технологических методов, позволяют не только определять возможные методы изготовления деталей, но и производить подбор материала детали для конкретного технологического метода.

Методика формализованного выбора технологических методов наиболее эффективна при реализации ее в составе САПР/АСТПП и может применяться как при решении производственных задач, так и в учебных целях.

Литература

1. *Исследование обобщенных параметров процесса деталяобразования и разработка гибкого оборудования, работающего на новых принципах: Отчет о НИР ГБ-97-241 (заключительный) / ВГТУ; Рук. В.С. Мисевич; № ГР 19971227. — Витебск, 1998. — 119 с.: рис. — Спис. лит. 2. Азгальдов Г.Г. Теория и практика оценки качества товаров (основы квалиметрии). — М.: Экономика, 1982. — 256 с. 3. *Общий алгоритм связи деталей и техноло-**

гических процессов / Мисевич В.С., Гришаев А.Н., Климентьев А.Л., Кузьменков С.М. // Совершенствование технологических процессов и организации производства в легкой промышленности и машиностроении: Сб. статей. — Витебск: ВГТУ, 1997. — С. 114-116. 4. Климентьев А.Л. Общий алгоритм связи деталей и технологических процессов // Технические ВУЗы — Республике: Материалы. — Минск: БГПА, 1997. — С. 11. 5. Климентьев А.Л., Мисевич В.С. Детали, допускающие множественность вариантов процесса их формообразования // Машиностроение: Сб. научн. трудов. Вып. 18 / Под ред. И.П. Филонова. — Минск: УП «Технопринт», 2002. — С. 122-126.

УДК 621.923

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЗАТУПЛЕНИЯ И ИЗНАШИВАНИЯ НА СОСТАВЛЯЮЩИЕ СИЛЫ ПРОФИЛЬНОГО ГЛУБИННОГО ШЛИФОВАНИЯ

Масилевич А.В., Махаринский Е.И.

Витебский государственный технологический университет
Витебск, Беларусь

Разработаны алгоритм и программа для численного определения составляющих силы шлифования P_x , P_y , P_z при любой форме рабочей поверхности шлифовального круга, некоторые из которых показаны на Рис 1. Программа позволяет учитывать изменение формы профиля и его режущих свойств, происходящее неравномерно для различных участков профиля.

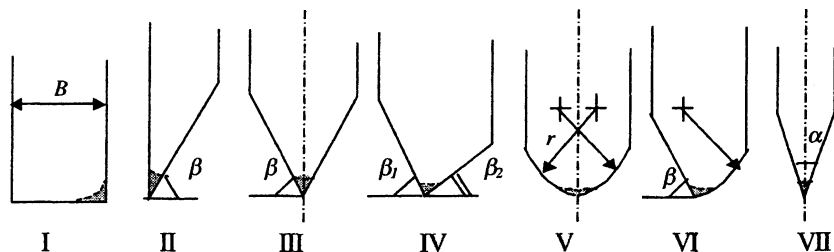


Рис. 1

 — зона износа

Исходными данными для определения составляющих силы шлифования являются: обобщенный коэффициент режущей способности K_{po} [1]; ко-

эффицент абразивного резания $f_a = P_z/P_y$; глубина канавки; рисунок профиля рабочей части шлифовального круга, выполненный в формате DXF ASCII, который поддерживает большинство популярных САД пакетов; скорость подачи; режим работы отдельных участков шлифовального круга (самозатачивание или затупление); модель изнашивания «острой» кромки профиля рабочей поверхности; модель затупления.

Алгоритм основан на разбиении круга на одноугловые участки достаточно малой ширины ΔB (микроучастки). Составляющие силы шлифования находятся как суммы элементарных сил шлифования на этих участках из системы:

$$P_x = \sum_{i=1}^N [\sin \beta_i] \Delta P_{zN};$$

где N — число микроучастков; β_i — угол наклона образующей текущего микроучастка; μ_i — угол между проекцией радиальной составляющей силы резания для микроучастка на плоскость ZOY и осью OY (характеризует распределение давления по дуге контакта),

$$\mu_i = 0.97843 \cdot \sqrt{(2a_i/D_i)}$$

$$\Delta P_{zN} = 60 \cdot [a_i \cdot s \cdot L_i / (D_i \cdot p \cdot n \cdot K_{po})] \Delta B$$

a_i, L_i, D_i — соответственно глубина, длина дуги контакта, диаметр i -ого микрокруга; s — продольная подача; n — частота вращения шлифовального круга.

При помощи разработанной программы, для профилей на Рис. 1 было проведено исследование влияния износа кромки (зона износа на рисунке) от некоторой величины r_o (начального) до $r_{кр}$ (критического износа) на составляющие силы шлифования. Было рассмотрено два случая: когда по мере износа производится корректировка положения круга с целью сохранения заданной глубины канавки и когда круг находится в фиксированном положении в течении всего контролируемого периода изнашивания.

Было установлено, что при работе шлифовального круга в режиме самозатачивания с компенсацией износа коррекцией размерной настройки, компоненты силы шлифования по-разному увеличиваются в зависимости от формы рабочего профиля (от 7% до 71%). Значительное увеличение значения составляющих силы шлифования связано с тем, что при коррекции на глубину канавки изменяется ее ширина. Если коррекция на глубину не производится, то составляющие силы шлифования растут в зависимости от формы профиля на 1..12%, а иногда даже уменьшаются.

Так для профиля II, зависимость составляющих силы от износа показаны на Рис. 2. При этом, диаметр шлифовального круга 120 мм, угол профиля 50° , ширина круга 8 мм, $K_{po} = 0.005$, $f_a = 0.3333$ (считали, что круг работает в режиме самозатачивания, так, что эти коэффициенты не изменяются в тече-

нии контролируемого периода износа $T_{из}$), продольная подача 1 мм/с, скорость резания 30 м/с, глубина канавки 5 мм.

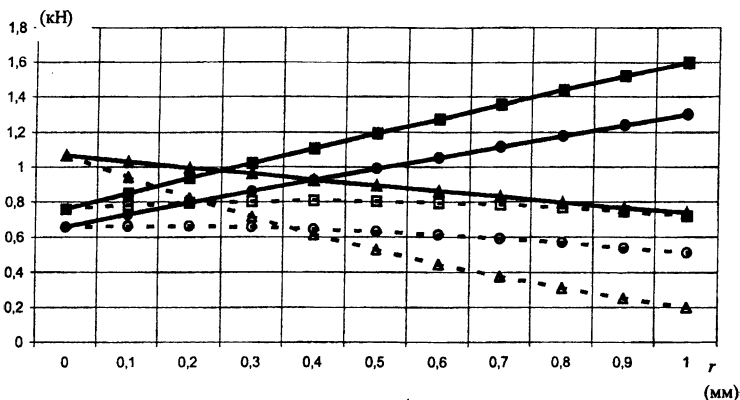


Рис. 2 (—) — составляющие силы шлифования при корректировке положения круга с сохранением глубины резания 5 мм в течении всего периода $T_{из}$; (---) — с фиксированной установкой; \blacktriangle — P_x ; \blacksquare — P_y ; \bullet — P_z

При затуплении круга, который работает в режиме частичного самозатачивания, значения коэффициентов K_{po} и f_a уменьшаются со временем.

Принимая во внимание связь K_{po} и K_p [1], для обобщенного коэффициента режущей способности можно использовать модель затупления плоского шлифования [2]:

$$K_{po} = (K_{рон} - K_{рос}) \exp(-Mt) + K_{рос},$$

где $K_{рос}$ — стабильное значение обобщенного коэффициента режущей способности; $K_{рон}$ — начальное значение обобщенного коэффициента режущей способности (непосредственно после правки); M характеризует темп затупления и равняется $\ln(2) / t_h = 0,693 / t_h$, где t_h — время, за которое коэффициент режущей способности $K_{po} = (K_{рон} + K_{рос}) / 2$, t — текущее время. Интенсивность уменьшения обобщенного коэффициента режущей способности может быть различной для различных условий шлифования.

Коэффициент абразивного резания изменяется незначительно, причем с уменьшением зернистости интенсивность изменения уменьшается [3]. Так как при профильном шлифовании применяют преимущественно средние и мелкозернистые круги, то значение коэффициента f_a можно считать постоянным на контролируемом временном интервале.

Так как $K_{рос}$ зависит от силы шлифования, характер изменения $K_{ро}$ будет различным для различных участков контактного профиля, работающих с разной нагрузкой. В первом приближении предполагалось, что на кромке $K_{ро} = K_{рон}$ для всего контролируемого периода износа (кромка работает в режиме самозатачивания), а остальные участки контактного профиля в течение периода $T_{из}$ работают в режиме затупления. Для участков, работающих в режиме затупления, в качестве примера принимаем, что $t_h = T_{из}/3$, $K_{рос} = 0.3 K_{рон}$. Для вышлифовки метрической резьбы с шагом $S = 1$ мм период стойкости круга обычно составляет 20 мин. Допустимый износ кромки в этом случае $r \in [0.1..0.2]$. Пусть круг изнашивается до критической величины по истечении периода стойкости (что соответствует рационально заправленному кругу). Тогда для шести контрольных значений износа $r \in [0.1, 0.12, 0.14, 0.16, 0.18, 0.2]$ на равных временных интервалах и периода $T_{из} = 1200$ с., что соответствует предполагаемой модели износа кромки $r = 8 \cdot 10^{-5} \text{ Ч} t + 0.1$, получены зависимости составляющих силы шлифования от времени работы круга (Рис. 3) (сплошные линии).

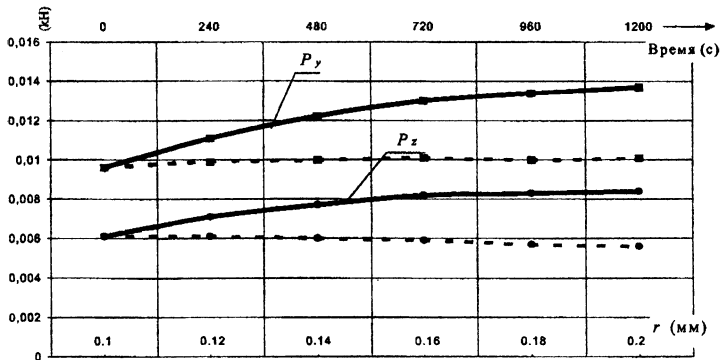


Рис. 3. Зависимости $P_y = f(r)$, $P_z = f(r)$ с учетом затупления

Для сравнения на графике приведены кривые изменения составляющих силы шлифования при работе в режиме самозатачивания (штриховые линии). График показывает, что без учета затупления P_y растет с износом кромки (от 0.1 до 0.2 мм) на 5%, а P_z падает на 8%. С учетом затупления P_y растет уже на 30%, P_z растет на 27%.

Таким образом, можно использовать разработанную программу для анализа и управления процессом глубинного шлифования с учетом неравномерного изнашивания и затупления шлифовального круга. Для этого необходимо экспериментально определять зависимости $K_{ро}$ и r от времени при раз-

личных характеристиках пары круг-заготовка. Значение f_a можно брать из справочной литературы [3].

Данная разработка может оказаться полезной для предприятий переходящих на новый перспективный метод глубинного шлифования зубчатых колёс [4] или направляющих станков без предварительного фрезерования.

Литература

1) Махаринский Е.И., Масилевич А. В. «Рабочие характеристики глубинного шлифования» – Сб. научных трудов «Машиностроение» 2001 Вып. 17. С. 38–42;

2) М.И. Ящерицын, Е.И. Махаринский, Ю.Е. Махаринский «Моделирование затупления шлифовального круга» – Вестні Академії Навук 1997 №4 С. 49–54;

3) Попов С.А. Малевский Н.П. и др. Алмазно-абразивная обработка металлов и твердых сплавов. М.: Машиностроение, 1977. – стр. 106 таб. 57

4) Ю.С. Елисеев, В.С. Новиков и др. «Профильное глубинное шлифование зубчатых колес» — Вестник машиностроения 2001 №1 С. 41–44.

УДК 621

ИНФОРМАЦИОННЫЕ МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЗАДАЧ

Мисевич В.С.

*Витебский государственный технологический университет
Витебск, Беларусь*

1. Широкое применение САПР ТП и станков с ЧПУ, сделали необходимым постоянное использование понятия «информация» при проектировании технологических процессов, а также при исследовании перспектив развития технологии [1, 2]. Однако само понятие «информация» берет свое начало, в значительной мере, в математической теории связи К.Шеннона и не всегда отвечает задачам технологии машиностроения. Поэтому для моделей технологических задач необходимо уточнить и ограничить понятие «информация».

2. Самым общим понятием (категорией), используемым при описании окружающей нас реальности, является понятие «Мир», «Универсум». Для описания Мира используются такие категории как *пространство* и *материя*, заполняющая пространство. В свою очередь, материя характеризуется *разнообразием*

и движением, изменяющим разнообразие. Движение материи происходит в пространстве и во времени. Разнообразие материи, рассматриваемое в определенный момент времени, представляет собой *конфигурацию*, т. е. взаиморасположение частиц материи с учетом их вида, взаиморасположение материальных тел, а также форму и напряженность силовых полей с учетом их природы. Наиболее общим результатом движения материи во времени является *эволюция* — изменение ее разнообразия. Каждому моменту времени соответствует своя конфигурация материи. *Последовательность конфигураций* отражает эволюцию начальной конфигурации и представляет собой содержание понятия времени.

Конфигурация может быть *общей*, относящейся ко всему Миру, но может быть и *частной*, относящейся к ограниченной физической системе. Конфигурация может быть изменяющейся, *кинематической*, а может быть и неизменной, *статической*. Среди статических особое место занимают *жесткие* конфигурации, не изменяющиеся от ограниченных внешних воздействий. Очевидно, что к ним относятся твердые тела. *Деталь* представляет собой жесткую статическую конфигурацию.

Именно понятие конфигурации физической системы позволяет достаточно четко установить содержания понятия «информация» в ограниченном *физическом* смысле, не претендующем на общесистемное, философское и другие значения.

Информация — это данные о конфигурации материи в выбранной физической системе, полученные в целях человека и отраженные в некоторой искусственной конфигурации в соответствии с принятым кодом.

Процесс изготовления детали — это целенаправленное изменение исходной конфигурации (заготовки) для получения необходимой статической жесткой конфигурации (детали) с помощью потоков информации и энергии.

Информация в технологическом аспекте является еще более узким понятием, чем информация в физическом смысле, и является информацией о технологической системе.

Технологическая информация — это данные измерений конфигурации технологической системы, добытые в целях проектанта или оператора и зафиксированные в некоторой искусственной конфигурации (носителе информации) в соответствии с принятым кодом.

3. К технологическим задачам, которые целесообразно решать с помощью понятия информации, можно отнести: 1) задачи классификации технологий; 2) задачи проектирования и исследования процессов обработки, описания функционирования технологического оборудования — функциональные задачи; 3) задачи описания на системном уровне методов формообразования и их выбора и синтеза.

4. С помощью понятия информации может быть выполнена наиболее общая классификация технологий — видов технологической деятельности человека. В любой технологической системе существуют потоки информации I , энергии E и материи — материала M . Но один из них (или сочетание двух и более) определяют вид технологии. Рассмотрим соединения I , E , M и вытекающую из них классификацию технологий (в широком смысле).

I — информация — выработка информации (измерительные устройства), передача информации (связь, интернет), переработка информации (ЭВМ);

E — энергия — выработка энергии (электростанции), передача энергии (ЛЭП);

M — материал — добыча и первичная переработка материала (шахты и обогатительные фабрики);

IE — энцрмация — формообразование на станках с ЧПУ (сервопривод);

IM — информат — хранение информации (носители, в частности, диски), перенесение информации на расстояние (письма, газеты);

EM — эмермат — сохранение энергии (аккумулятор, нефть);

IEM — креация — создание деталей (литье, стереолитография).

Наиболее важный вывод который следует из этой классификации, заключается в том, что изготовление (творение) деталей является наиболее сложным видом человеческой деятельности, так как включает в себя в качестве основных все три потока I , E , M .

6. Информационная модель перемещения рабочего органа станка, управляемого сервоприводом, может быть представлена в виде $I_{\text{при}} = l / \Delta l$, где l — длина перемещения в мм; Δl — дискрета системы ЧПУ. Соответствующая ей модель памяти регистра ЭВМ имеет форму $I_{\text{сис}} = 2^n$. Для нормальной работы необходимо, чтобы выполнялось неравенство $I_{\text{сис}} > I_{\text{при}}$. Эти информационные модели тривиальны и не требуют пояснений. Однако единицу измерения этой линейной информации, строго говоря, нельзя назвать битом, так как бит (binary item — двоичная единица) определяется как информационная энтропия H канала с двумя элементами ($n = 2$) с вероятностью их состояния в «единице» 0,5 ($p_i = 0,5$) [3]. Для избежания путаницы целесообразно называть частное от деления величины на ее дискрету (квант), например $l/\Delta l$, — «квит» (quantum item — квантовая единица). Однако сложившаяся традиция труднопреодолима.

7. Информационная модель пропускной способности электронных устройств системы ЧПУ строится как число импульсов (датчика), проходящих через электронику в единицу времени, и называется добротностью D [4]. Для нормального протекания процесса обработки добротность системы должна быть больше добротности процесса.

8. Информационная модель формообразующей способности сервопривода — энирмация — строится как произведение потока информации на поток энергии [5]:

$$W = \frac{I}{t} \cdot \frac{E}{t} = \frac{\varphi / \Delta\varphi}{t} \cdot \frac{M\varphi}{t} = \frac{M}{\Delta\varphi} \cdot \frac{\varphi^2}{t^2}$$

Для процесса обработки и сервопривода с шаговым двигателем энирмация может быть представлена в форме

$$W = \frac{M}{\Delta\varphi} \omega^2$$

где M — крутящий момент двигателя (процесса), а $\Delta\varphi$ — его угловая дискрета. Для шагово-импульсных сервоприводов энирмацию удобно представлять в форме:

$$W = k_{кр} \omega^2$$

где $k_{кр}$ — крутильная жесткость сервопривода. Для нормальной работы системы необходимо обеспечить неравенство $W_{сис} > W_{при}$.

Энирмация является величиной сохраняющейся. Ее нельзя изменить за счет механических передач от двигателю к шпинделю.

На рис. 1 показана схема связи величин, которые служат для описания функционирования станка в самом общем виде.

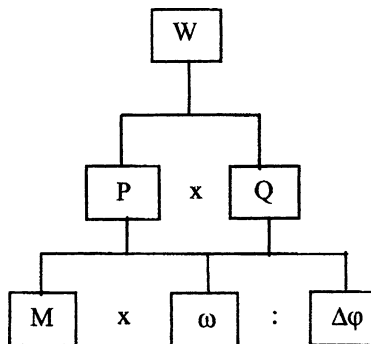


Рис. 1. Схема связи величин, описывающих работу шпинделя в станке с ЧПУ

Энирмация позволяет не только выбрать сервопривод для выполнения конкретного процесса обработки, но и создать обоснованный типоразмерный ряд сервоприводов. Так некоторые управляющие системы фирмы Siemens имеют энирмацию, превышающую энирмацию любого процесса обработки, выполняемого на станках.

9. Модель технологической системы в виде серого ящика показана на рис. 2. *Кондиционер* — это совокупность устройств и средств, обеспечивающих условие протекания процесса обработки. *Креатор* — это устройство непосредственно формирующее деталь т. е. сервопривод с инструментом. *Воздействие* — это процесс воздействия на материал заготовки потоков информации и энергии. К технологической системе подводится материал M , энергия E и информация I . Информация может подводиться в свободном виде или в связанном, в соединении с энергией $I + E$, как в сервоприводе, или в соединении с материалом $I + M$, как в прокате. В зависимости от способа подачи информации в технологическую систему, с учетом физики процесса воздействия, будет изменяться процесс формообразования. Рассмотрев все варианты подачи информации в технологическую систему и все виды воздействий, можно получить полный перечень методов формообразования на системном уровне.

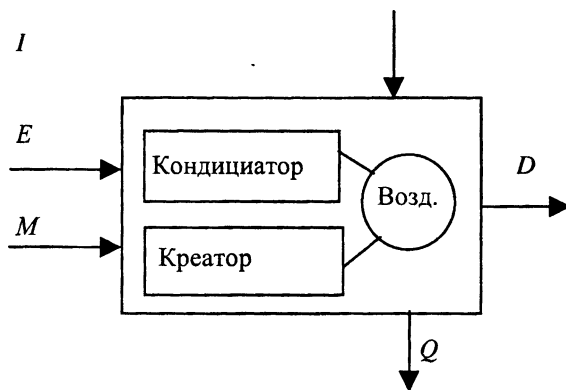


Рис. 2. Серый ящик технологической системы

Литература

1. Смирнов А.И. Анализ перспектив развития методов формообразования в машиностроении. Обзор. — М, НИИМАШ, 1982.—49 с.
2. Мисевич В.С., Нисневич Я.Г. Использование понятия информации при проектировании технологических процессов и автоматических обрабатывающих систем // Ред. ж. “Станки и инструмент”. —1986. — 43 с. Деп. в ВНИИТЭМР 18.05.87. № МШ-87.
3. Яглом А.М., Яглом И.М. Вероятность и информация.— М.: Наука, 1973.— 511 с.
4. Алексеева Н.Н., Лебедев А.Н. Система синхронизации вращения шпинделей инструмента и изделия // Станки и инструмент, № 1,

1978. С 15–16. 5. Мисевич В.С., Нисневич Я.Г. Проектирование системы управления с синхронной связью для станков с ЧПУ // Станки и инструмент, № 10, 1988. С34–36.

УДК 621.833.389

АНАЛИЗ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РАБОЧИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ПРУЖИННО-ПАЛЬЦЕВЫХ ПЕРЕДАЧАХ

Пашкевич М.Ф., Рогачевский Н.И., Рогачевский С.Н.
Могилевский государственный технический университет
Могилев, Беларусь

В изделиях машиностроения широко применяются червячные редукторы благодаря их известным достоинствам, которые проявляются в полной мере лишь при соблюдении достаточной точности зацепления, обусловленной не только высокой точностью деталей редуктора, но и величинами погрешностей их взаимного расположения, которые регламентированы более жестко чем, например, в редукторах с цилиндрическими зубчатыми передачами. Существенным недостатком червячных редукторов является низкий КПД, обусловленный геометрией и кинематикой зацепления. Стремление устранить недостатки червячных передач привело к созданию пружинно-пальцевых винтовых передач, которые представляют собой новый тип передач со скрещающимися осями. Эти передачи по принципу работы схожи с червячными передачами, но имеют существенное отличие – отсутствие червяка и собственно червячного колеса. Вместо червяка здесь используется закрепленная на ведущем валу витая цилиндрическая пружина, а вместо червячного колеса применяется диск с закрепленными в нем в подшипниках пальцами. Такие передачи просты в изготовлении, не требуют высокой точности изготовления деталей и их монтажа, так как упругая податливость пружины компенсирует значительные погрешности, не имеют дорогостоящих антифрикционных материалов, и обеспечивают высокий КПД, так как в них трение скольжения заменено качением витков пружины по вращающимся в подшипниках качения пальцам. Они отличаются конструктивной простотой, низкой материалоемкостью, высокой ремонтопригодностью, возможностью работы при отсутствии масляной ванны (то есть в качестве открытых передач).

Для научно обоснованного подхода к проектированию пружинно-пальцевых передач необходима теория зацеплений в этих передачах. Некоторые

фрагменты теории изложены в работах [1–3]. Статьей [3] предпринята первая попытка исследования геометрической картины зацепления элементов такой передачи. При этом диапазон изменения фазы зацепления не был привязан к действительному коэффициенту перекрытия ε_z передачи. Приведенный анализ описывал зацепление пальцев колеса с вращающейся только по часовой стрелке пружины с правой навивкой ее витков. Численный пример характеризовал только одно положение фазы зацепления, что явно недостаточно для полного анализа. Устранению указанных пробелов посвящена настоящая работа.

Исследуем зацепление вращающейся против часовой стрелки пружины с левой навивкой ее витков с пальцами колеса. Исходные данные для исследований: D_0 — средний диаметр пружины, мм; t — шаг витков пружины, мм; d — диаметр стержня, из которого выполнена пружина, мм; z_2 — число пальцев червячного колеса; ε_y — коэффициент перекрытия; D — диаметр пальца, мм; n — число разбиений шага.

Аппроксимируем проекцию рабочего участка винтовой линии на осевую плоскость пружины прямой линией [3]

$$z = \frac{z_1}{x_1} \cdot x,$$

где x_1 и z_1 — координаты границы рабочего участка винтовой линии пружины, определяемые соотношениями

$$x_1 = 0,5 \cdot t \cdot z_2 \cdot [1 - \cos(\pi \cdot \varepsilon_y / z_2)],$$

$$z_1 = \frac{t}{2 \cdot \pi} \cdot \arcsin[2 \cdot x_1 / (D_0 + d)].$$

Взаимное расположение витков пружины и пальцев колеса рассмотрим в проекциях их на торцовую плоскость xOy колеса (осевую плоскость пружины) и на торцовую плоскость $x_{II}Oy_{II}$ пружины (рис. 1): К, L, М, N — точки пересечения аппроксимирующих прямых витков и оси пружины; Б, В, Г, Д — центры пальцев, расположенных на делительной окружности колеса, диаметр которого d_2

$$d_2 = t \cdot z_2 / \pi.$$

Координаты точки А касания пружины и пальца с центром Б очевидны из рис.2:

$$x_A = 0,5 \cdot (d_2 \cdot \sin \gamma_B - D \cdot \cos \alpha);$$

$$y_A = 0,5 \cdot (d_2 \cdot \cos \gamma_B - D \cdot \sin \alpha),$$

где γ_B — фаза зацепления

$$-\pi \cdot \varepsilon_\gamma / z_2 \leq \gamma_B \leq (2 - \varepsilon_\gamma) \cdot \pi / z_2;$$

β — угол подъема аппроксимирующих прямых

$$\alpha = \arctg(z_1 / x_1).$$

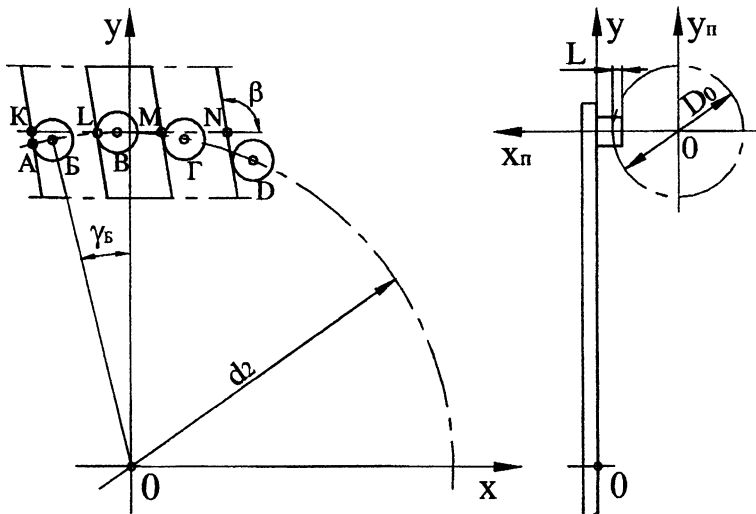


Рис. 1.

Уравнения аппроксимирующих прямых, проходящих соответственно через точки К, L, М, N:

$$\operatorname{tg} \beta \cdot x - y + d_2 / 2 - x_K \cdot \operatorname{tg} \beta = 0;$$

$$\operatorname{tg} \beta \cdot x - y + d_2 / 2 - (x_K + t) \cdot \operatorname{tg} \beta = 0;$$

$$\operatorname{tg} \beta \cdot x - y + d_2 / 2 - (x_K + 2t) \cdot \operatorname{tg} \beta = 0;$$

$$\operatorname{tg} \beta \cdot x - y + d_2 / 2 - (x_K + 3t) \cdot \operatorname{tg} \beta = 0,$$

где β — угол наклона аппроксимирующих прямых к оси Ox , равный

$$\beta = \alpha + \pi / 2.$$

Координаты центров В, Г, D пальцев передачи

$$x_B = \frac{d_2}{2} \cdot \sin(\gamma_B + \frac{2 \cdot \pi}{z_2}), y_B = \frac{d_2}{2} \cdot \cos(\gamma_B + \frac{2 \cdot \pi}{z_2});$$

$$x_G = \frac{d_2}{2} \cdot \sin(\gamma_B + \frac{4 \cdot \pi}{z_2}), y_G = \frac{d_2}{2} \cdot \cos(\gamma_B + \frac{4 \cdot \pi}{z_2});$$

$$x_D = \frac{d_2}{2} \cdot \sin(\gamma_B + \frac{6 \cdot \pi}{z_2}), y_D = \frac{d_2}{2} \cdot \cos(\gamma_B + \frac{6 \cdot \pi}{z_2}).$$

Расстояния $S_{PB}, S_{PB}, S_{PG}, S_{PD}$, между контурами пальцев В, Г, D и соответствующими аппроксимирующими прямыми рабочих участков винтовых линий витков пружины: $S_{PB}=0$, то есть при всех значениях γ_B палец Б соприкасается с пружиной, что является базой отсчета расстояний от контуров пальцев В, Г, D до соответствующих аппроксимирующих прямых;

$$S_{PB} = \sqrt{[tg \beta \cdot x_B - y_B + d_2 / 2 - (x_K + t) \cdot tg \beta]^2 / (tg^2 \beta + 1) - d_2 / 2};$$

$$S_{PG} = \sqrt{[tg \beta \cdot x_G - y_G + d_2 / 2 - (x_K + 2 \cdot t) \cdot tg \beta]^2 / (tg^2 \beta + 1) - d_2 / 2};$$

$$S_{PD} = \sqrt{[tg \beta \cdot x_D - y_D + d_2 / 2 - (x_K + 3 \cdot t) \cdot tg \beta]^2 / (tg^2 \beta + 1) - d_2 / 2}.$$

Положительные величины S_{PB}, S_{PG} и S_{PD} указывают на наличие зазоров между соответствующими пальцами и витками пружины, а отрицательные – на их интерференцию. В реальной передаче, при работе ее под нагрузкой, из-за упругих деформаций витков пружины зазоры исчезнут, вместо интерференции будет наблюдаться соприкосновение пальцев с витками пружины, а нагрузки между пальцами распределятся обратно пропорционально величинам зазоров и прямо пропорционально значениям интерференций.

Величина L осевого перекрытия пальцев торцовым контуром пружины для обеспечения требуемого значения γ_z очевидна из рис. 1:

$$L = 0,5 \cdot D_0 - \sqrt{D_0^2 / 4 - d_2^2 \cdot [1 - \cos(\arctg(x_A / y_A))]^2 / 4}.$$

На рис. 2 представлены результаты расчета на примере зацепления пружины ($D_0=36$ мм, $t=18$ мм, $d=4$ мм) с колесом ($z_2=32, D=11$ мм) в интервале $[-0,175$ рад, $0,011$ рад] изменения фазы зацепления (равном угловому шагу) для пальца Б. При постоянном соприкосновении этого пальца с витком, содержащим точку А (прямая 1), расстояние от соответствующих витков до пальца В изменится от 0,14 мм до -0,44 мм (кривая 2), до пальца Г – от -0,35 мм до -2,14 мм (кривая 3), до пальца D – от -2,14 мм до -5,28 мм (кривая 4). Таким образом, только между витком и пальцем В при изменении фазы зацепления от -0,175 рад до -0,109 рад существует уменьшающийся от 0,14 мм

до 0 зазор, в остальных случаях — интерференции. Из рис. 2 видно, что с целью исключения значительных величин интерференций (от -2,14 мм до -5,28 мм, кривая 4), то есть более равномерного распределения нагрузки между пальцами, целесообразно предотвратить зацепление пружины с пальцем D, что равнозначно снижению коэффициента перекрытия с 4 до 3.

Полученный алгоритм исследования изменений геометрической картины зацеплений элементов пружинно-пальцевой передачи при повороте колеса в пределах углового шага является исходным для исследования статики и динамики этой передачи.

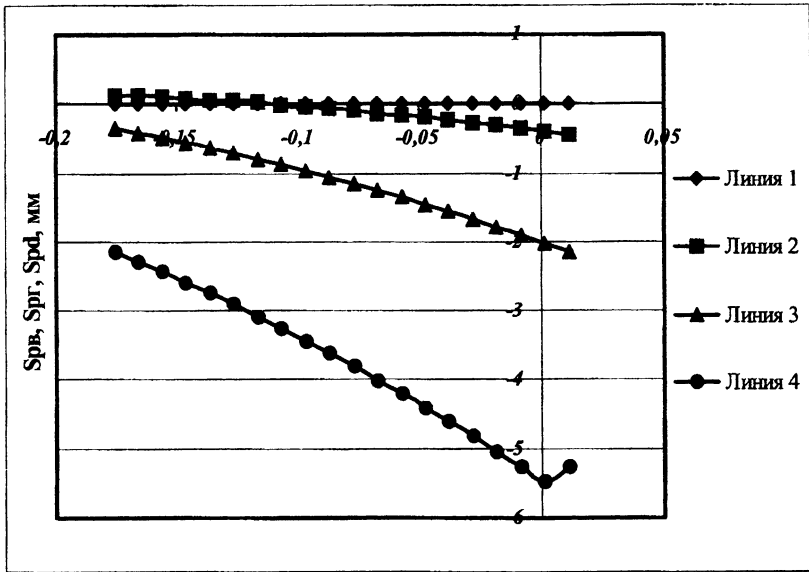


Рис. 2

Литература

1. Пашкевич М.Ф. Коэффициент перекрытия пружинно-винтовой передачи / М.Ф. Пашкевич, Н.И. Рогачевский, С.Н. Рогачевский // Современные технологии, материалы, машины и оборудование: Материалы междунар. науч.-техн. конф. – Могилев, 2002. – С. 100-101.
2. Пашкевич М.Ф. Совершенствование изготовления червяков пружинно-винтовой передачи / М.Ф. Пашкевич, Н.И. Рогачевский, С.Н. Рогачевский

кий // Вестник Могилевского государственного технического университета. — 2002. — № 2.

3. Пашкевич М.Ф. Геометрический анализ зацеплений в пружинно-винтовых передачах / М.Ф. Пашкевич, Н.И. Рогачевский, С.Н. Рогачевский // Прогрессивные технологии, машины и механизмы в машиностроении: Сборник научных статей междунар. НТК «Балттехмаш-2002». — Калининград, 2002. — С. 173–175.

УДК 621.914.6

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ МАКСИМАЛЬНОЙ ТОЛЩИНЫ СРЕЗА ПРИ ЗУБОФРЕЗЕРОВАНИИ

Сюбаров В.В., Мисевич В.С.

*Витебский государственный технологический университет
Витебск, Беларусь*

Обеспечение высокой стойкости червячных модульных фрез является важным условием их эффективной эксплуатации [1]. Зубья фрезы нагружены неравномерно: при одной осевой установке существует только один зуб с максимальным износом, определяющий ее стойкость. При этом вершинная режущая кромка зуба снимает максимальный срез и имеет максимальный износ. Поэтому для определения стойкости червячных фрез необходимо уметь определять толщину среза на вершине зуба.

Нами разработана методика определения толщины среза на вершине зуба червячной модульной фрезы. Как показали расчеты, для прямозубых колес и колес с небольшими углами наклона зуба, по мере приближения зуба фрезы к межосевому перпендикуляру толщина среза a_z уменьшается, а длина среза l_{cp} увеличивается. В соответствии с теорией резания, износ зуба пропорционален длине среза l_{cp} и толщине среза в некоторой степени n , т.е. пропорционален a_z^n . На основании анализа процессов обработки резанием принимаем $n=1,6$. Таким образом, максимальный износ имеет зуб с максимальным произведением $a_z^{1,6} \times l_{cp}$. Такой зуб является критическим.

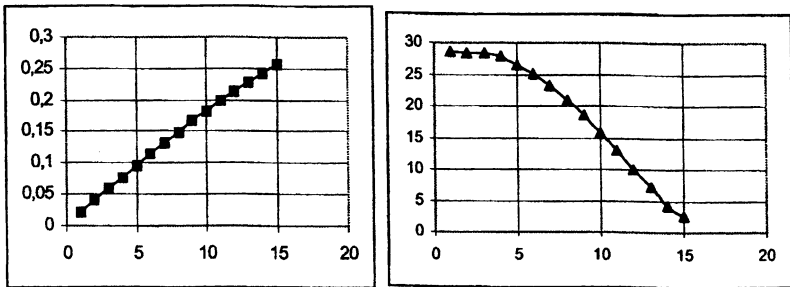
Как показали расчеты, толщина среза критического зуба связана с максимальной толщиной среза соотношением $a_{z_кр} = 0.655a_{z_max}$. Следовательно, для определения стойкости фрез, а также для сравнения стойкости однозаходных и многозаходных фрез важно уметь определять максимальную величину среза a_{z_max} .

Целью работы является получение математической модели, связывающей максимальную толщину среза с режимами резания и конструктивными параметрами червячных модульных фрез. В целях выделения основных факторов, влияющих на толщину среза, незначимые факторы отброшены, что внесло погрешности не превышающие 5 %.

На рис. 1 показаны графики a_z , l_{cp} и произведения $a_z^{1,6} \times l_{cp}$ для различных зубьев фрезы при фрезеровании колеса $m = 4$ мм, $z = 40$ червячной фрезой диаметром $D_f = 90$ мм с числом заходов $k = 1$ и числом реек $Z_f = 10$ при осевой подаче $s_o = 3,2$ мм/об. Из графика видно, что 8-й зуб является критическим.

$$a_z = f(N_{зуба})$$

$$l_{cp} = f(N_{зуба})$$



$$a_z^{1,6} \times l_{cp} = f(N_{зуба})$$

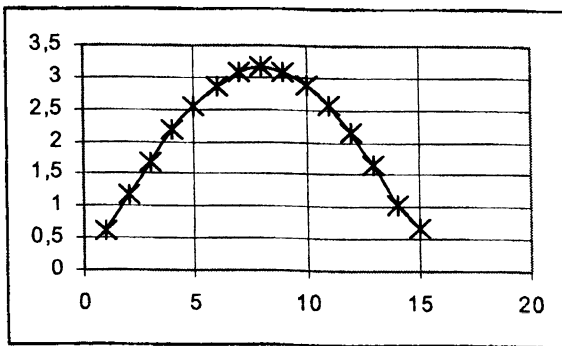


Рис. 1.

На рис. 2 приведена схема для определения a_{z_max} при обработке прямозубого колеса. Максимальная величина проекции подачи на нормаль к режущей кромке в торцевой плоскости колеса

$$s_{N_max} = \frac{\pi t k}{Z_f} \cdot \frac{AB}{r}, \quad (1)$$

где t — модуль колеса; r — радиус делительной окружности; k — число заходов фрезы; Z_f — число реек фрезы; AB — длина участка фрезы, на котором ее зубья работают вершинными режущими кромками.

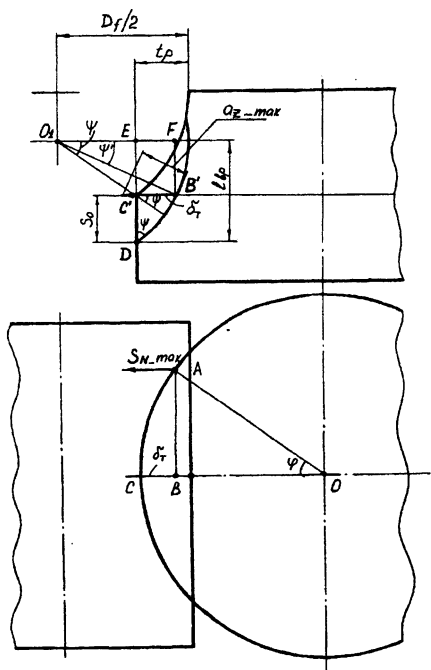


Рис. 2

Из рис. 2

$$AB = \sqrt{r_a^2 - (r_a - \delta_T)^2} = \sqrt{2r_a \delta_T - \delta_T^2}, \quad (2)$$

где r_a — радиус головок зубьев колеса; $\delta_T = BC$. Т. к. $\delta_T \ll r_a$, то величиной δ_T^2 можно пренебречь. В результате получим

$$AB = \sqrt{2r_a \delta_T}, \quad (3)$$

$$s_{N_max} = \frac{\pi t k}{Z_f} \cdot \frac{\sqrt{2r_a \delta_T}}{r} = \frac{\pi t k}{Z_f} \cdot \sqrt{\frac{2r_a \delta_T}{r^2}}, \quad (4)$$

Примем $\frac{r_a}{r} \approx 1$, тогда окончательно

$$s_{N_max} = \frac{\pi mk}{Z_f} \cdot \sqrt{\frac{2\delta_T}{r}}, \quad (5)$$

Теперь эту величину необходимо спроектировать на плоскость передней грани рейки фрезы, которая снимает срез максимальной толщины. Для этого необходимо учесть угол ψ' поворота рейки относительно торцевой плоскости. Получим

$$a_{z_max} = s_{N_max} \cdot \cos \psi' = \frac{\pi mk}{Z_f} \cdot \sqrt{\frac{2\delta_T}{r}} \cdot \cos \psi'. \quad (6)$$

Из треугольников $B'C'D$, CEO_1 и $B'FO_1$ (см. рис. 2)

$$\delta_T = s_o \cdot \operatorname{tg} \psi, \quad (7)$$

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{l_{op} - s_o}{D_f/2 - t_p}, \quad (8)$$

$$\cos \psi' = \sqrt{1 - \sin^2 \psi'} = \sqrt{1 - \left(\frac{l_{op} - s_o}{D_f/2} \right)^2}, \quad (9)$$

где D_f — диаметр червячной фрезы; t_p — глубина резания; l_{op} — длина врезания. Из рис. 2 $l_{op} = \sqrt{(D_f - t_p)t_p}$. Примем $l_{op} - s_o = \sqrt{D_f t_p}$. Окончательно, для максимальной толщины среза получим формулу

$$a_{z_max} = \frac{\pi mk}{Z_f} \cdot \sqrt{\frac{2s_o}{r}} \cdot \sqrt{\frac{2(D_f - 4t_p)}{D_f - 2t_p}} \cdot \sqrt{\frac{t_p}{D_f}}, \quad (10)$$

Формула (10) позволяет ранжировать параметры процесса резания по степени влияния на максимальную толщину среза: наибольшее влияние оказывают модуль m , число заходов фрезы k (увеличивают) и число реек Z_f (уменьшает); среднее влияние оказывает осевая подача s_o (увеличивает) и радиус колеса r (уменьшает); наименьшее влияние оказывает диаметр червячной фрезы D_f (уменьшает) и глубина резания t_p (увеличивает). Эти соотношения действительны при малых изменениях глубины резания, при $t_p \approx 2m$.

В соответствии с понятиями, введенными Лашневым С.И. [2]; подача сближение (глубина резания), установочная подача (подача на ход, оборот), рабочая подача (подача на зуб, окружная подача), — первый множитель в (10) отражает влияние осевой подачи, второй множитель — влияние ус-

тановочной (осевой) подачи и третий сомножитель — влияние глубины резания на максимальную толщину среза.

Полученная формула (10), вместе с понятием критического зуба фрезы, позволяет определить отношение стойкостей однозаходных и многозаходных фрез при заданных параметрах обработки, раскрыть факторы эффективности многозаходных фрез и определить условия их применения.

Литература

1. Шевченко А.Н. Перспективы развития производства зуборезного инструмента //СТИН. —2001. —№ 6. —С.19–22.
2. Лашнев С.И., Юликов М.И. Проектирование режущей части инструмента с применением ЭВМ. —М.: Машиностроение, 1980. —180 с.

МЕТАЛЛУРГИЯ

УДК 620.17:669.76

МИКРОТВЕРДОСТЬ БЫСТРОЗАТВЕРДЕВШИХ ФОЛЬГ СПЛАВОВ Bi-(8...12) ат. % Sb

Демидчик А.В., Шепелевич В.Г.

*Белорусский государственный университет
Минск, Беларусь*

Сплавы Bi-(8...12) ат. % Sb являются низкотемпературными полупроводниковыми материалами, которые нашли применение при изготовлении различных термоэлектрических устройств. Монокристаллы сплавов висмут-сурьма при низких температурах в силу своей морфологии структуры имеют низкую механическую прочность и подвержены разрушению. Кроме того, при их кристаллизации с малыми и средними скоростями образуется дендритная структура, ухудшающая технические параметры. В связи с этим актуальным является использование новых методов синтеза данного сплава, позволяющих получить однородное распределение компонентов и увеличить прочностные характеристики. Одним из путей, при котором удастся полностью или частично избежать указанных недостатков, является увеличение скорости кристаллизации сплава [1]. Поэтому в данной работе представлены результаты исследования микротвердости фольг сплавов Bi-(8...12) ат. % Sb, полученных сверхбыстрой закалкой из расплава, при которой скорость охлаждения жидкой фазы $\sim 10^6$ К/с.

Сверхбыстрая закалка проводилась двумя методами: в первом случае капля расплава выбрасывалась между двумя вращающимися отполированными приведенными в соприкосновение медными цилиндрами разного диаметра, во втором — капля расплава выбрасывалась на внутреннюю отполированную поверхность вращающегося медного цилиндра. Толщина фольг составляла 20...60 мкм. Измерение микротвердости проводилось на приборе ПМТ-3 с использованием нагрузки 10 г. Изохронный отжиг быстрозатвердевших фольг проводился в интервале температур 20...270 °С с выдержкой по 10 минут через каждые 20 °С. Изотермический отжиг проводился при различных температурах в течение нескольких часов.

Установлено, что у фольг, полученных методом двухстороннего охлаждения, микротвердость H_m несколько выше, чем у фольг, полученных методом одностороннего охлаждения (рис. 1). Это связано с тем, что получаемые двухсторонним охлаждением фольги имеют более мелкую зеренную структуру, что подтверждается металлографическими исследованиями. Кроме того, с ростом концентрации сурьмы в сплаве микротвердость монотонно возрастает.

гает. Это обусловлено тем, что при легировании висмута сурьмой происходит усиление ковалентных сил связи между атомами [2], а также измельчением зеренной структуры в сплаве висмут-сурьма.

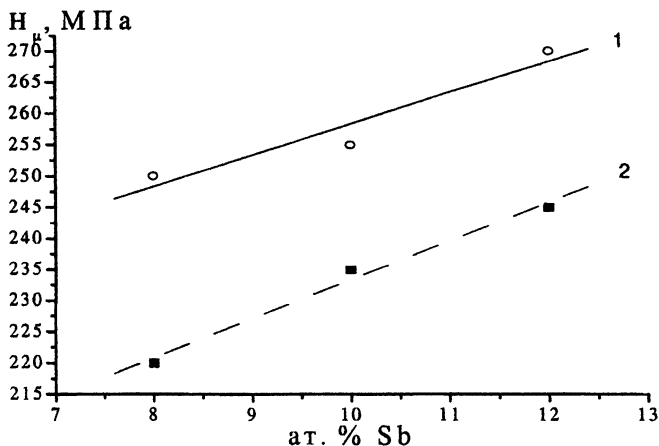


Рис. 1. Зависимость микротвердости H_{μ} от концентрации сурьмы в висмуте для фольг, полученных: 1 — методом двухстороннего охлаждения, 2 — методом одностороннего охлаждения

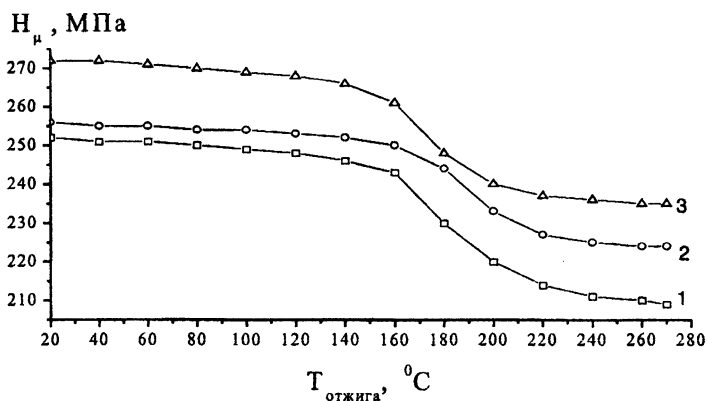


Рис. 2. Зависимость микротвердости фольг, полученных методом двухстороннего охлаждения, от температуры при изохронном отжиге.

1 — Bi - 8 ат. % Sb, 2 — Bi - 10 ат. % Sb, 3 — Bi - 12 ат. % Sb

Изохронный отжиг до температуры $\gg 150^\circ\text{C}$ не оказывал влияние на микротвердость. Начиная с температуры 150°C вплоть до 220°C наблюдается уменьшение H_m . В интервале $220\dots 270^\circ\text{C}$ микротвердость практически не изменяется (рис.2). Уменьшение микротвердости в интервале температур $150\dots 220^\circ\text{C}$ связано, как показали результаты металлографических исследований, с протеканием собирательной рекристаллизации, при которой происходит увеличение среднего размера зерна [3]. На рис. 3 представлены графики зависимостей микротвердости быстрозатвердевших фольг Bi-8 ат. \% Sb и Bi-12 ат. \% Sb , полученных методом двухстороннего охлаждения, от времени изотермического отжига при 170°C . Повышение температуры изотермического отжига способствует более быстрому уменьшению H_m .

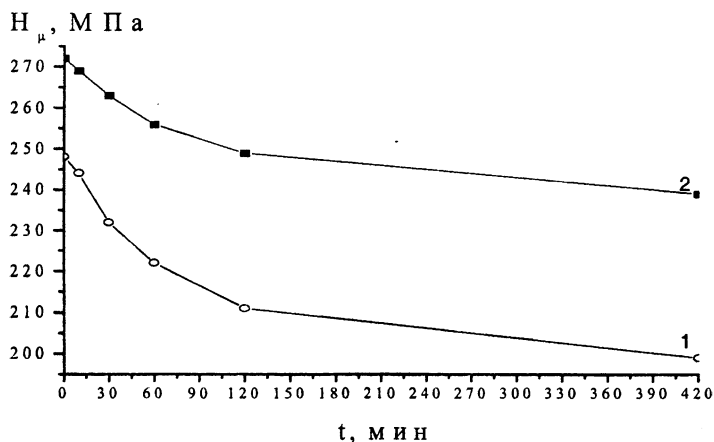


Рис. 3. Зависимость микротвердости фольг, полученных методом двухстороннего охлаждения, от времени изотермического отжига ($T_{\text{отжига}} = 170^\circ\text{C}$). 1 — Bi-8 ат. \% Sb , 2 — Bi-12 ат. \% Sb

Таким образом, при фиксированной концентрации сурьмы в сплаве Bi-Sb микротвердость фольг, полученных двухсторонним охлаждением, выше микротвердости фольг, полученных односторонним охлаждением. С ростом концентрации сурьмы в сплаве микротвердость для обоих типов фольг увеличивается. Быстрозатвердевшие фольги сплава $\text{Bi-(8\dots 12) ат. \% Sb}$ находятся в неустойчивом состоянии. При их нагреве происходит изменение структуры и свойств. Изохронный отжиг в интервале $150\dots 220^\circ\text{C}$ ведет к уменьшению микротвердости. Изотермический отжиг при 170°C также уменьшает микротвердость.

Литература

1. Мирошниченко И.С. Закалка из жидкого состояния. —М.: Metallurgia, 1982. —168с.
2. Гицу Д.В., Голбан И.М., Канцер В.Г. и др. Явления переноса в висмуте и его сплавах. —Кишинев: Штиинца, 1983. —237с.
3. Новиков И.И. Теория термической обработки металлов. —М.: Metallurgia, 1978. —392 с.

УДК 621.762.5

ДРЕНАЖНЫЕ КОЛПАЧКИ НА ОСНОВЕ ВЯЗАНОЙ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ СЕТКИ

Александров В.М., Шабалинский А.А., Гасак Т.В.,
Бадыкин А.А.,* Михно В.П.*

Институт порошковой металлургии, Брестские тепловые сети
Минск, Брест, Беларусь*

Эффективная работа котельных в значительной степени зависит от системы водоподготовки и, в частности, от технологии очистки и умягчения воды. Для умягчения воды широко применяются ионитные фильтры, в том числе натрий- и водород-катионитовые.

Обработка воды с высокой карбонатной жесткостью осуществляется натрий-катионитовыми фильтрами. В качестве катионита используются: сульфуголь, катионит КУ2-8 и др. Обработка воды методом натрий-катионирования заключается в фильтровании ее через слой гранул катионита, содержащего в качестве обменных ионов катионы натрия. В случае высокой карбонатной жесткости применяется водород-катионирование.

Конструктивно ионитный фильтр состоит из корпуса, верхнего распределительного устройства, запорной арматуры, нижнего распределительного устройства (НРУ).

При работе ионитных фильтров вода под давлением 6-7 кг/см² поступает в фильтр через верхнее распределительное устройство, проходит слой фильтрующей засыпки и отводится через НРУ. При достижении в умягченной воде определенной концентрации ионов Ca²⁺ и Mg²⁺ фильтр отключается для регенерации.

НРУ предназначено для равномерного распределения воды по сечению фильтра и выполняется в виде «ложного дна», состоящего из плоского метал-

лического листа с приваренными к нему штуцерами, к которым крепятся дренажные колпачки. Такая конструкция позволяет исключить сложный и трудоемкий ремонт основания фильтра, и увеличить полезный объем загрузки.

В настоящее время дренажные колпачки изготавливают из различных материалов. Однако опыт эксплуатации колпачков из пластмассы и керамики показал их недостаточную надежность. Деструкция материала в результате повышенных температур и перепада давления приводит к увеличению размера щелей либо отрыву колпачков с мест крепления во время промывки фильтра противотоком. Последнее приводит к уносу дорогостоящей фильтрующей засыпки. Кроме того, невысокая пропускная способность таких колпачков создает гидравлическую неустойчивость во время эксплуатации и регенерации. В Институте порошковой металлургии (ИПМ) разработаны дренажные колпачки из пористых сетчатых материалов (ПСМ), отличающиеся высокой прочностью, проницаемостью, устойчивостью к тепловым и ударным нагрузкам. В качестве исходного материала используется проволока из коррозионно-стойкой стали марки 03X18H9T-ВИ (ТУ 14-1-1702-76). Технология получения ПСМ, включает следующие операции, вязание сетки, получение пакетов, их уплотнение, обезжиривание, спекание, штамповку, сварку. Деформирование заготовки из металлической сетки по радиальной схеме нагружения обеспечивает необходимую прочность изделия с одновременным формированием его пористой структуры. Механическая прочность изделия обуславливается наличием перфорированного несущего каркаса.

Работу дренажного колпачка характеризуют с помощью коэффициента расхода μ , его величина, главным образом, зависит от таких факторов, как гидравлический режим, геометрические размеры, условия работы колпачка, и изменяется в пределах $0,08-0,5 / 3$.

С увеличением скорости течения воды коэффициент расхода имеет тенденцию к росту, однако при достижении значений скорости порядка $0,8-1,2$ м/с μ остается постоянным. Анализ зависимости коэффициента расхода от скорости воды в дренажных колпачках различного типа (ВТИ-К производства АО «Красный котельщик», ФЭЛ-Т производства ПП «Тэко-фильтр», г. Жигулевск, ЭПС-М производства ИПМ, г. Минск) показывает, что при равных скоростях подачи воды коэффициент расхода дренажного колпачка ЭПС-М выше, чем у аналогов на 20–25%.

Проведенные испытания выявили преимущества колпачков из ПСМ по сравнению с известными аналогами:

- исключается проскок засыпки через поры колпачка;
- реализуется обработка исходной воды при повышенной температуре;
- повышается производительность.

Системы дренажа с колпачками из ПСМ типа ЭПС-М внедрены на предприятиях Брестэнерго и Могилевэнерго.

УДК 669.715:548.735

ФАЗООБРАЗОВАНИЕ В БЫСТРОЗАТВЕРДЕВШИХ ФОЛЬГАХ СПЛАВОВ АЛЮМИНИЯ

Василевич Е.Ю., Гутько Е.С., Шепелевич В.Г.

Белорусский государственный университет

Минск, Беларусь

При сверхбыстрой закалке металлов из жидкой фазы создается структура, существенно отличающаяся от структуры, формируемой при кристаллизации в условиях, близких к равновесным [1]. Быстрое затвердевание металлов и сплавов приводит к измельчению зерен, уменьшению размеров выделений, расширению границ растворимости и образованию метастабильных кристаллических, а при определенных условиях — и аморфных фаз [2]. При нагреве быстрозатвердевших алюминиевых сплавов происходят фазовые превращения, связанные с распадом пересыщенного твердого раствора, растворением метастабильных и выделением стабильных фаз. В данной работе представлены результаты исследования фазообразования быстрозатвердевших фольг сплавов Al-Ge, Al-Fe, Al-Ni, Al-Mn и Al-Zn, а так же изменение их фазового состава при отжиге.

Быстрозатвердевшие фольги получали выплескиванием капли расплава требуемого состава на внутреннюю поверхность вращающегося медного цилиндра. Толщина фольг находилась в пределах от 10 до 100 мкм. Для исследования использовались фольги толщиной 30-80 мкм. Скорость охлаждения расплава, как показал расчет [1], порядка 10^6 К/с. Фазовый состав изучали методом рентгеноструктурного анализа. Съемка образцов проводилась в медном излучении на дифрактометре ДРОН-3.

Результаты рентгеноструктурного анализа для фольг сплавов Al — 3,2 ат. %, 5 ат. %, 10 ат. % Ge показывают, что наряду с дифракционными линиями алюминия и германия имеются дополнительные дифракционные линии, принадлежащие γ -фазам. Обнаруженные γ -фазы являются метастабильными γ_1 - и γ_2 -фазами с ромбоздрической ($a=0,7672$ нм, $d=96,55^\circ$) и моноклинной ($a=0,6734$ нм, $b=0,5818$ нм, $c=0,4282$ нм, $d=88,96^\circ$) ячейками [3].

Быстрозатвердевшие сплавы алюминия с 5 и 10 ат.% Ge подверглись отжигу при температурах 160 и 320°C. На рентгенограммах сплавов, отожжен-

ных при 160°C, отсутствуют какие-либо отличия по сравнению с неотожженными фольгами. Интенсивность линий твердого раствора на основе алюминия, германия и γ -фаз по сравнению с рентгенограммами неотожженных образцов практически не меняется. Рентгенограммы фольг, отожженных при 320°C, содержат только дифракционные линии алюминия и германия, интенсивность которых выше, чем на рентгенограммах неотожженных фольг. Таким образом при отжиге быстрозатвердевших сплавов Al-Ge в интервале температур от 160 до 300°C происходит распад пересыщенного твердого раствора германия в алюминии и метастабильных фаз. Установленный нами температурный интервал распада γ -фаз согласуется с температурами начала распада фаз γ_1 и γ_2 , полученными для массивных образцов [4].

Рентгеноструктурный анализ исходных образцов быстрозатвердевших фольг сплавов Al-Fe, содержащих до 1,5 ат.% Fe, выделений второй фазы не обнаружил. Установлено, что при нагреве до 100°C происходит изменение параметра элементарной ячейки, что указывает на начало распада пересыщенного твердого раствора на основе алюминия. Отжиг фольги сплава Al-1,5 ат.% Fe при 230°C в течение двух часов вызывает появление дополнительных дифракционных отражений на рентгенограммах, по положению которых определялись межплоскостные расстояния новой фазы (d_s), приведенные в таблице 1. Там же представлены величины межплоскостных расстояний (d_r), рассчитанные для метастабильной фазы Al_6Fe , имеющий ромбическую кристаллическую решетку с параметрами элементарной ячейки $a=0,6492$ нм, $b=0,7437$ нм, $c=0,87885$ нм [5]. Совпадение d_s и d_r указывает на то, что при распаде твердого раствора Al-Fe происходит сначала выделение метастабильной фазы Al_6Fe .

Таблица 1

Экспериментально определенные и рассчитанные межплоскостные расстояния фазы Al_6Fe

d_s , нм	0,3640	0,3422	0,2138	0,2080	0,1832
d_r , нм	0,3639	0,3425	0,2137	0,2078	0,1829
индексы плоскостей	(102)	(021)	(222)	(310)	(321)

Отжиг фольг сплавов Al — 1 и 2 ат.% Fe в интервале температур 400–500°C приводит сначала к уменьшению интенсивностей дифракционных линий метастабильной фазы Al_6Fe , а затем к их исчезновению. Одновременно происходит проявление новых дифракционных линий, которые принадлежат стабильной фазе Al_3Fe , имеющей моноклинную

кристаллическую решетку с параметрами $a=1,552$ нм, $b=0,8099$ нм, $c=1,2501$ нм и $\alpha=107^\circ 43$.

Быстрозатвердевшие фольги сплавов системы Al-Ni, содержащие от 0,3 до 1,2 ат.% никеля, состоят из пересыщенного твердого раствора алюминия и выделений стабильной интерметаллической фазы Al_3Ni , имеющий ромбическую решетку с параметрами элементарной ячейки $a=0,6611$ нм, $b=0,7360$ нм, $c=0,4900$ нм. Достижимая растворимость никеля в твердом растворе алюминия достигает $\sim 0,4$ ат.%, что значительно превышает его равновесную растворимость при комнатной температуре. Нагрев быстрозатвердевших фольг выше температуры $100^\circ C$ вызывает уменьшение параметра элементарной ячейки твердого раствора алюминия, что указывает на начало его распада. Отжиг выше $260^\circ C$ выявил усиление интенсивности дифракционных линий фазы Al_3Ni , а при температуре отжига $480^\circ C$ наблюдается ослабление и усиление других ее дифракционных линий. Это указывает как на выделение данной фазы при распаде пересыщенного твердого раствора, так и на протекающие процессы коалесценции ее частиц [6].

Основной фазой быстрозатвердевших фольг сплавов системы Al-Mn, содержащих от 0,5 до 2 ат.% Mn, является пересыщенный твердый раствор на основе алюминия. Достижимая растворимость марганца в алюминии, как показали исследования зависимости параметра элементарной ячейки твердого раствора от состава, достигает 1,5 ат.%. Рентгеноструктурные исследования не обнаружили дифракционных линий, принадлежащих другим фазам. Изохронный отжиг фольг сплавов Al — 2 ат.% Mn в интервале от 100 до $300^\circ C$ вызывает незначительное уменьшение параметра элементарной ячейки, однако при нагреве выше $300^\circ C$ происходит его существенное увеличение. Отжиг при $300^\circ C$ вызывает появление дополнительных дифракционных отражений на рентгенограммах, которые принадлежат стабильной фазе Al_6Mn , имеющей ромбическую структуру с параметрами элементарной ячейки $a=0,6498$ нм, $b=0,7552$ нм, $c=0,7779$ нм.

На рентгенограммах исходных быстрозатвердевших фольг сплавов системы Al-Zn, содержащих от 1 до 4 ат.% Zn, наблюдаются только дифракционные линии твердого раствора на основе алюминия. Нагрев фольг сплавов Al — 2 и 4 ат.% Zn до $300^\circ C$ не привел к каким-либо изменениям в структуре сплавов. Рентгеноструктурный анализ, отожженных фольг при температурах $300^\circ C$ и выше, обнаружил появление дополнительных дифракционных линий, принадлежащих цинку, что обусловлено распадом пересыщенного твердого раствора алюминия.

Таким образом, в фольгах бинарных сплавов алюминия, полученных сверхбыстрой закалкой из жидкой фазы, основной фазой является пересы-

щенный твердый раствор на основе алюминия, в котором могут присутствовать выделения стабильных и метастабильных фаз. Отжиг быстрозатвердевших фольг вызывает распад пересыщенного твердого раствора, а также растворение и выделение фаз. Температура начала выделения фаз и их стабильность зависят от легирующего элемента.

Литература

1. Мирошнеченко И.С. Закалка из жидкого состояния — М.: Металлургия, 1982. — 168 с.
2. Lavernia E.J., Ayers J.D., Srivatsan T.S. Rapid solidification processing with specific applications to aluminium alloys. *Int. Mater. Rev.*, 1992, v.37, 1, p.1–44.
3. Ташлыкова-Бушкевич И.И., Шепелевич В.Г, Гутько Е.С.. Метастабильные фазы в быстрозатвердевших слабелегированных сплавах системы Al-Ge. *Физика и химия обработки металлов*, 2002, № 3., с. 79–85.
4. Ojha S. N. Undercooling and metastable phase formation in Al-Ge alloys. *Z. Metallkunde*, 1991, Bd. 82, 1, S. 41–47.
5. Василевич Е.Ю., Гутько Е.С., Шепелевич В.Г. Структура и свойства быстрозатвердевших фольг сплавов системы Al-Fe. Сб. н. тр. «Теоретические и технологические основы упрочнения и восстановления изделий машиностроения». Изд-во ПГУ. 2001. с.162.
6. Василевич Е.Ю., Шепелевич В.Г. Структура и свойства быстрозатвердевших фольг сплавов системы Al-Ni. Сб. н. тр. *Машиностроение*. 2001, вып. 17, с.256–260.

УДК 621.762

ИЗОСТАТИЧЕСКОЕ ПРЕССОВАНИЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ДЛИННОМЕРНЫХ ЗАГОТОВОК НА ОСНОВЕ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Богинский Л.С., Петюшик Е.Е., Божко Д.И., Якубовский А.Ч.

Белорусский национальный технический университет

Минск, Беларусь

Области применения порошковых материалов с развитием техники и технологии постоянно расширяются. Часто предпочтение отдается керамическим материалам на основе оксидов и карбидов, обладающим комплексом высоких эксплуатационных свойств: высокой жаро- и износостойкостью,

твердостью, прочностью, способностью противостоять воздействию агрессивных сред и др. По различным причинам характерна тенденция к производству массивных керамических изделий со значительным отношением поперечных размеров к длине: фильтрующих элементов — для увеличения грязеемкости, расходных электродов — для обеспечения возможности организации более длительного непрерывного цикла процесса нанесения защитных покрытий с целью повышения производительности и качества, инструментальных изделий — для расширения их номенклатуры.

Исходя из комплекса требований, предъявляемых к свойствам и размерам массивных керамических изделий, чаще всего существует общность требований, предъявляемых к параметрам заготовок на всех стадиях изготовления изделия. Так, на стадии прессования основные требования к прессовке обычно таковы: отсутствие нарушения сплошности, высокая равномерность распределения плотности по объему, минимальное количество примесей в материале, «набираемых» в процессе прессования.

В большинстве случаев процессы прессования керамических материалов затруднены их физико-механическими свойствами: высокими показателями твердости и прочности, высокой хрупкостью. Это накладывает технологические ограничения на размеры и форму прессовок при их уплотнении, вызывает необходимость введения значительного количества связующих веществ, что приводит к загрязнению материала. Поэтому большинство наиболее распространенных способов прессования порошковых материалов оказываются неприемлемы для прессования длинномерных керамических изделий значительных размеров.

На рис. 1 приведен пример результата прессования заготовки дорна для калибрования отверстий из порошка на основе карбида вольфрама в зависимости от схемы прессования. При осевом прессовании в жесткой матрице (рис. 1, а) заготовки могут либо разрушаться, либо в скрытой форме имеют направленные плоскости искусственно наведенной системы трещин, которые могут слиться в единую поверхность разрушения на стадии разгрузки заготовки или в процессе ее спекания. Хорошо видны поверхности разрушения соответствующие «ковочному кресту» (пересечение линий скольжения) и распространяющихся на всю длину (или значительную ее часть) образца. Причиной такого разрушения является наличие внешнего трения заготовки и деформирующего инструмента, вызывающее неравномерность плотности прессовки на фоне ограниченного ресурса пластичности материала порошка. Кроме того, прессование по схеме одноосного сжатия для класса длинномерных изделий не позволяет в широких пределах варьировать формой прессовки, что определяет увеличение расхода материала и трудоемкости последующих технологичес-

ких операций механической обработки. Имеющий место градиент плотности по объему изделия вызывает и неравномерность ряда эксплуатационных свойств готового изделия. такого разрушения является наличие внешнего трения заготовки и деформирующего инструмента, вызывающее неравномерность плотности прессовки на фоне ограниченного ресурса пластичности материала порошка. Кроме того, прессование по схеме одноосного сжатия для класса длинномерных изделий не позволяет в широких пределах варьировать формой прессовки, что определяет увеличение расхода материала и трудоемкости последующих технологических операций механической обработки. Имеющий место градиент плотности по объему изделия вызывает и неравномерность ряда эксплуатационных свойств готового изделия.

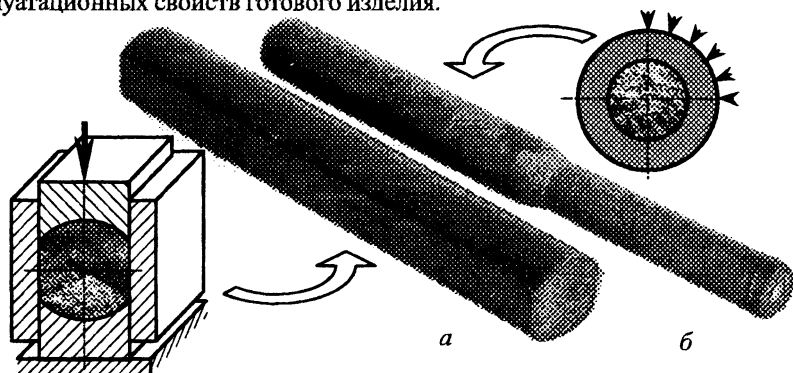


Рис. 1. Схема прессования стержня из порошка на основе карбида вольфрама:
а — одноосная; б — радиальная

Более приемлема радиальная схема прессования (рис. 1, б), обеспечивающая равномерное распределение плотности по объему прессовки, снижение энергозатрат на процесс прессования, возможность усложнения формы прессовки и формирования специальных конструктивных элементов (центровых отверстий и т.п.). Наряду со схемой изостатического прессования радиальная схема [1] является классической для прессования крупногабаритных и длинномерных изделий из порошковых материалов, в том числе из порошков с ограниченным ресурсом пластичности. Реализуется радиальная схема обычно способами гидро- или газостатического, гидродинамического и сухого изостатического прессования.

Все способы прессования, предусматривающие воздействие на дискретную заготовку жидкого или газообразного тела, предполагают необходимость

герметизации формы с заготовкой и предварительного вакуумирования такой формы. Необходимость последней операции обусловлена наличием в объеме дискретной заготовки воздуха, который в процессе прессования сжимается и, оставаясь в порах прессовки, способен при снятии давления ее разрушить. Для керамических прессовок, обладающих весьма низкой прочностью на растяжение непосредственно после этапа прессования, это обстоятельство особенно важно. Основные способы декомпрессии – предварительное вакуумирование, вакуумирование прессмассы в форме в процессе прессования (при этом прессование производят в несколько последовательных ступеней) и плавный сброс давления после процесса прессования. Наличие операций вакуумирования и герметизации формы существенно усложняют технологический цикл прессования по указанным способам, затрудняют его механизацию и автоматизацию, снижают производительность, отрицательно сказываются на культуре производства.

Применение способа сухого изостатического прессования [1] позволяет отказаться от дегазации формы с порошком и, тем более, не требует ее герметизации. Наоборот, возможность сообщения тела порошковой заготовки с атмосферой через зазоры в технологической оснастке обеспечивает выход воздуха из порового пространства уже на стадии повышения давления прессования. Скорость декомпрессии прессовки зависит от ряда факторов: плотности, гранулометрического состава порошка и формы частиц, влажности шихты, размеров прессовки [2]. С увеличением размера прессовки скорость декомпрессии уменьшается, что определяет соответствующие требования к технологическим режимам прессования.

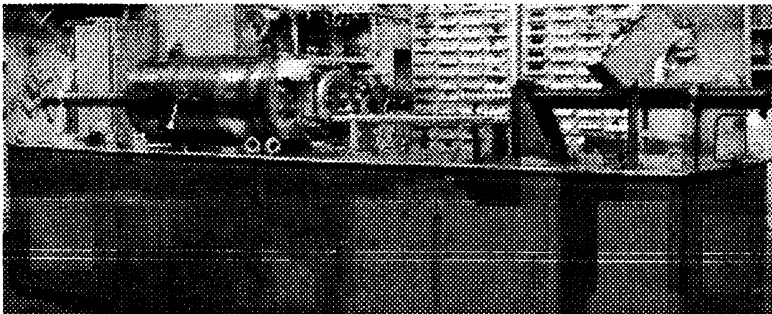


Рис. 2. Общий вид установки для радиально-изостатического прессования

Для прессования цилиндрических длинномерных изделий в виде массивных цилиндров из керамических порошков разработана конструкция и

изготовлена установка для радиально-изостатического прессования (рис. 2), снабженная устройством контролируемого плавного сброса высокого давления с целью декомпрессии прессовки. Установка обеспечивает возможность прессования массивных заготовок из порошков на основе диоксида циркония с максимальными размерами: длина — до 500 мм, наружный диаметр — до 80 мм при работе в ручном или полуавтоматическом режиме.

Установка содержит замкнутую гидравлическую систему высокого давления и снабжена встроенным источником высокого давления на базе насоса гидравлического регулируемого НГР-2000. Максимальное давление прессования — до 120 МПа. Вспомогательные перемещения механизированы и осуществляются посредством гидроприводов, объединенных замкнутой гидросистемой низкого давления. Установка обеспечивает производительность до 10 циклов в час.

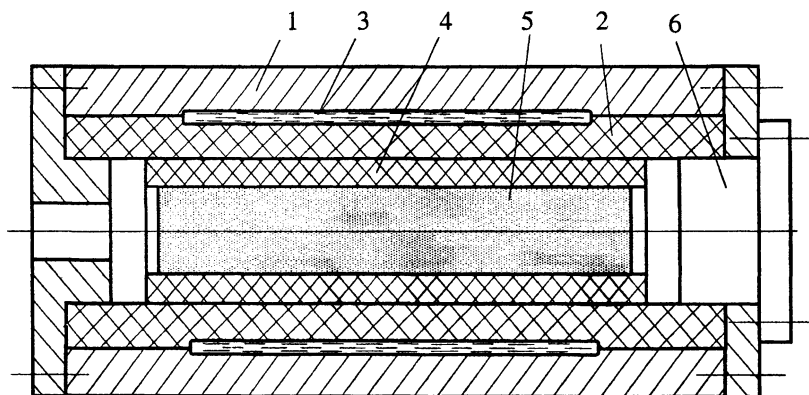


Рис. 3. Схема пресс-блока установки для радиально-изостатического прессования

Основным исполнительным узлом установки является пресс-блок (рис. 3). В основу его работы положен принцип радиального обжатия уплотняемого материала давлением жидкости через эластичные передающие среды. Кольцевой зазор между корпусом 1 и вкладышем 2 образует герметичную рабочую полость 3, заполненную жидкостью (маслом). Тем самым исключен контакт рабочей жидкости с формой, эластичная оболочка 4 которой передает давление непосредственно на порошок 5. Центральное отверстие вкладыша 2 образует рабочую камеру установки, определяющую размеры формы, используемой для прессования, и, таким образом, максимальные размеры получаемой прессовки. Осе-

вые деформации формы и прессовки 5 ограничены конструктивно, в том числе со стороны загрузочного отверстия — затвором 6. Заполнение формы исходной шихтой и извлечение прессовки производится вне установки. Переход на прессование изделий других размеров и конфигурации осуществляется заменой формы без переналадки оборудования.

Радиальное прессование по условиям деформирования уплотняемой заготовки в общем случае можно считать квазиизостатическим процессом. В случае, когда поперечные размеры прессовки невелики, а отношение к ним продольных размеров велико (более 5), краевые эффекты можно не учитывать. В случае прессования массивных прессовок, особенно для порошков с малой насыпной плотностью, наблюдается значительный градиент плотности на участках, примыкающих к торцам прессовки. Это обусловлено значительными перемещениями порошка в радиальном направлении и трением его по жестким элементам формы, а также реологическими свойствами материала эластичной оболочки. Для повышения равномерности распределения плотности по объему прессовки в процессе сухого радиально-изостатического прессования разработаны формы, содержащие составные эластичные оболочки, специальные эластичные прокладки и пробки, снижающие трение на границе порошок-форма и позволяющие реализовать в рассмотренном оборудовании схему изостатического нагружения порошковой заготовки.

Литература

1. Реут О.П., Богинский Л.С., Петюшик Е.Е. Сухое изостатическое прессование уплотняемых материалов. — Минск: «Дэбор», 1998. — 258с.
2. Попильский Р.Я., Кондрашев Ф.В. Прессование керамических порошков. М.: Metallurgia, 1968. — 272 с.

СТРУКТУРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЕФОРМИРОВАННЫХ ТЕЛ НАМОТКИ

Петюшик Е.Е., Якубовский А.Ч., Божко Д.И.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

Перспективным направлением в области создания новых пористых материалов (ПМ), в частности на волоконной основе, является разработка ПМ, обладающих регулярной структурой и сложным комплексом эксплуатационных свойств (подобно сетчатым материалам), но более технологичных и менее дорогостоящих. Установлена возможность получения таких материалов с это ПМ на основе проволоки. Процесс их изготовления включает в себя формирование проволоочной заготовки в виде тела намотки (ТН) путем сплошной крестовой намотки проволоки на цилиндрическую оправку и последующее деформирование ТН в условиях радиального нагружения [1].

Создание новых ПМ предполагает изучение их структурных характеристик, управление которыми для ПМ на основе проволоки в наибольшей мере осуществляется в процессе намотки проволоки. Однако окончательная структура ПМ формируется на стадии деформационной обработки ТН (рис. 1), в результате которой происходит радиальное уплотнение проволоочной заготовки за счет прогиба витков проволоки в межконтактных зонах и сближения витков в местах их взаимного контакта [2]. При этом перемещение наружного слоя ТН в радиальном направлении равно:

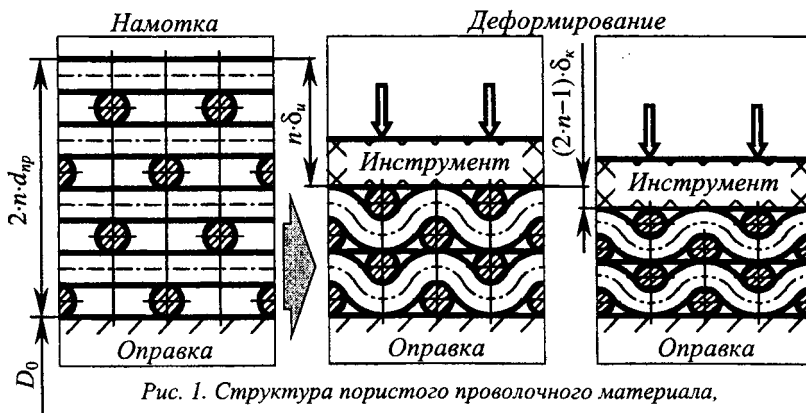


Рис. 1. Структура пористого проволоочного материала, изменяющаяся в процессе изготовления

$$\Delta = n \cdot \delta_u + (2 \cdot n - 1) \cdot \delta_x, \quad (1)$$

где n — количество слоев намотки; $\delta_u = f(P_u)$ — прогиб витков проволоки в межконтактных зонах (пролетах); P_u — изгибающее усилие в единичном пролете; $\delta_x = f(P_x)$ — сближение витков в местах их взаимного контакта; P_x — усилие сжатия в единичном контакте.

Регулярная структура ТН с учетом деформационных процессов, происходящих при радиальном уплотнении проволочной заготовки, позволяет рассчитать структурные характеристики прессовки.

Пористость проволочного ПМ определяется выражением [3]:

$$\Pi = \frac{V - V_{np}}{V} = 1 - \frac{V_{np}}{V}, \quad (2)$$

где V — общий объем пористой прессовки; V_{np} — объем прессовки, занимаемый проволокой.

Общий объем прессовки равен:

$$V = \pi \cdot \frac{(D^2 - D_0^2)}{4} \cdot L_p, \quad (3)$$

где $D = D_0 + 2 \cdot (2 \cdot n \cdot d_{np} - \Delta)$ — наружный диаметр проволочного ПМ; D_0 — внутренний диаметр ПМ (диаметр оправки); d_{np} — диаметр проволоки; L_p — длина прессовки.

Для определения объема проволоки в прессовке, исходя из геометрии проволоки и ТН в целом и режимов намотки с учетом регулярности структуры проволочной заготовки, получено следующее выражение:

$$V_{np} = \pi \cdot \frac{d_{np}^2}{4} \cdot l_{np} = \pi \cdot \frac{d_{np}^2}{4} \cdot \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot n \cdot (D_0 + 2 \cdot n \cdot d_{np})}{d_{np} + s} \cdot L_p \right), \quad (4)$$

где l_{np} — длина проволоки, требуемая для изготовления ПМ; s — межвитковый зазор в слое ТН, выдерживаемый при намотке проволоки.

Тогда из совместного решения уравнений (2)–(4) находим:

$$\Pi = 1 - \frac{\pi \cdot d_{np}}{4 \cdot (d_{np} + s)} \cdot \frac{2 \cdot n \cdot d_{np} \cdot (D_0 + 2 \cdot n \cdot d_{np})}{(2 \cdot n \cdot d_{np} - \Delta) \cdot (D_0 + 2 \cdot n \cdot d_{np} - \Delta)} \quad \text{или}$$

$$\Pi = 1 - \frac{\pi}{4} \cdot \left(1 + \frac{s}{d_{np}} \right)^{-1} \cdot \frac{1}{\Omega}, \quad (5)$$

$$\text{где } \Omega = \Omega_1 \cdot \Omega_2 = \left(1 - \frac{\Delta}{2 \cdot n \cdot d_{np}} \right) \cdot \left(1 - \frac{\Delta}{D_0 + 2 \cdot n \cdot d_{np}} \right).$$

Средний размер пор проволочного ПМ определяем по формуле [3]:

$$d_{\Pi}^{cp} = \frac{\Pi}{1-\Pi} \cdot d_{np}, \quad (6)$$

С учетом равенства (5) формула (6) примет вид:

$$d_{\Pi}^{cp} = d_{np} \cdot \left[\frac{4}{\pi} \cdot \left(1 + \frac{s}{d_{np}} \right) \cdot \Omega - 1 \right], \quad (7)$$

Коэффициент извилистости пор проволочного ПМ определяется отношением [3]:

$$\xi = \frac{l_{\Pi}}{h}, \quad (8)$$

где l_{Π} — длина поры прессовки; h — толщина стенки прессовки.

Для определения длины поры, исходя из режимов намотки проволоки и ее геометрии с учетом регулярности структуры и величины перемещения наружного слоя ТН, получено следующее выражение:

$$l_{\Pi} = 2 \cdot d_{np} + (n-1) \cdot \sqrt{\left(2 \cdot d_{np} - \Delta \right)^2 + \left(\frac{d_{np} + s}{2 \cdot \cos \beta} \right)^2}, \quad (9)$$

где β — угол намотки.

Толщина стенки проволочной прессовки равна:

$$h = \frac{D - D_0}{2} = 2 \cdot n \cdot d_{np} - \Delta, \quad (10)$$

Тогда из совместного решения уравнений (8)–(10) находим:

$$\xi = \frac{\frac{1}{n} + \frac{n-1}{n} \cdot \sqrt{\left(1 - \frac{\Delta}{2 \cdot d_{np}} \right)^2 + \left(\frac{d_{np} + s}{4 \cdot d_{np} \cdot \cos \beta} \right)^2}}{1 - \frac{\Delta}{2 \cdot n \cdot d_{np}}} \quad \text{или}$$

$$\xi = \frac{1}{n \cdot \Omega_1} \cdot \left[1 + (n-1) \cdot \sqrt{\left(1 - \frac{\Delta}{2 \cdot d_{np}} \right)^2 + \left[\left(1 + \frac{s}{d_{np}} \right) \cdot \frac{1}{4 \cdot \cos \beta} \right]^2} \right], \quad (11)$$

Удельная поверхность пор проволочного ПМ с учетом того, что заготовка в виде ТН формируется путем намотки на оправку проволоки (одной непрерывной нити), площадью торцевой поверхности (сечения) которой можно пренебречь, определяется выражением [3]:

$$S_v = \frac{S_{np} - 2 \cdot n_{\kappa} \cdot S_{\kappa}}{V}, \quad (12)$$

где S_{np} — площадь боковой поверхности проволоки; S_{κ} — площадь межвиткового контакта; n_{κ} — количество межвитковых контактов в прессовке.

Площадь боковой поверхности проволоки равна:

$$S_{np} = \pi \cdot d_{np} \cdot l_{np}, \quad (13)$$

Площадь межвиткового контакта (в общем случае с эллипса) равна:

$$S_{\kappa} = \pi \cdot a \cdot b, \quad (14)$$

где a и b — размеры эллиптической площадки контакта (соответственно большая и малая полуоси эллипса).

Для определения количества контактов между витками проволоки в прессовке, исходя из геометрии проволоки и режимов намотки с учетом регулярности структуры ТН, получено следующее выражение:

$$n_{\kappa} = \frac{(n-1) \cdot l_{np}}{d_{np} + s} \cdot \sin 2\beta, \quad (15)$$

Объем пористой прессовки из выражений (2) и (4) равен:

$$V = \frac{\pi \cdot d_{np}^2 \cdot l_{np}}{4 \cdot (1 - \Pi)}, \quad (16)$$

Из совместного решения уравнений (12)–(16) находим:

$$S_V = 4 \cdot (1 - \Pi) \cdot \left(\frac{1}{d_{np}} - \frac{a \cdot b \cdot (n-1) \cdot \sin 2\beta}{d_{np}^2 \cdot (d_{np} + s)} \right), \quad (17)$$

Для определения размеров площадки контакта получены следующие выражения [4]:

$$a = 2,39 \cdot \frac{n_a}{n_p} \cdot d_{np} \cdot \frac{1 - \mu^2}{E} \cdot \sigma_T \quad \text{и} \quad b = 2,39 \cdot \frac{n_b}{n_p} \cdot d_{np} \cdot \frac{1 - \mu^2}{E} \cdot \sigma_T, \quad (18)$$

где n_a , n_b , n_p — коэффициенты, зависящие от угла намотки проволоки; μ , E , σ_T — соответственно коэффициент Пуассона, модуль упругости, предел текучести материала проволоки.

Тогда, с учетом равенства (5) окончательно получим:

$$S_V = \frac{\pi \cdot (d_{np} + s) - d_{np} \cdot (n-1) \cdot \sin 2\beta}{(d_{np} + s)^2} \cdot \left(\frac{1 - \mu^2}{E} \cdot \sigma_T \right)^2 \cdot \frac{18 \cdot n_a \cdot n_b}{n_p^2} \cdot \frac{1}{\Omega}, \quad (19)$$

Таким образом, из выражений (5), (7), (11), (19), описывающих структурные характеристики деформированных ТН, следует, что структура провололочной прессовки зависит от следующих факторов:

— размера (диаметра) и материала (механических свойств) наматываемой проволоки;

- режимов намотки проволоки при формировании заготовки в виде ТН (угла намотки, межвиткового зазора);
- геометрии получаемой заготовки (внутреннего диаметра ТН, числа слоев намотки, толщины стенки);
- режимов деформационной обработки ТН (силовых параметров процесса прессования).

Литература

1. Якубовский А., Петюшик Е. Технология получения пористых проволочных изделий // Материалы 22-го Международного научного симпозиума молодых научных работников и студентов. Зелена Гура, Польша. — 2001. — Т. Механика. — С. 247–252.
2. Main Aspects of the Theory and Technology of Producing Permeable Materials with the Organized Porous Structure Through Deformation Processing / Y. Piatsiushyk, O. Reut, A. Yakubouski, L. Boginsky // 15 International Plansee Seminar. Reutte, Austria. 2001. — V. 3. — P. 285–299.
3. Пористые проницаемые материалы: Справочник / Под ред. С.В. Белова. — М.: Metallurgia, 1987. — 335 с.
4. Напряженно-деформированное состояние в единичном контакте при упругом деформировании проницаемых материалов на основе проволоки в виде тел намотки / Е.Е. Петюшик, А.Ч. Якубовский, Ч.А. Якубовский, О.П. Реут // Весці Акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. — 2002. — № 2. — С. 10–15.

УДК 621.777

ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ ТРУБОК МАЛОГО ДИАМЕТРА ИЗ ЛЕНТЫ

Логачев М.В., Исаевич Л.А., Карпицкий В.С.
Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

В настоящее время в Республике Беларусь сложилась ситуация острого дефицита трубок малого диаметра ($d_{нар} = 1-2$ мм) из латуни, нержавеющей стали и др. металлов толщиной 0,15–0,2 мм для изготовления многообразных трубчатых изделий, деталей приборостроения, в производстве механических и электронных часов, в медицине. Затраты на приобретение трубчатых изделий малого диаметра за рубежом составляют от 200 до 300 тысяч долларов США в год и с каждым годом возрастают.

Проведенный анализ состояния технологии получения трубок малого диаметра позволяет сделать вывод о сложности данной проблемы, заключающейся в длительности технологического цикла изготовления трубок малого диаметра (свертка, прессование, волочение на оправке или без нее, сварка стыка и последующая окончательная обработка с целью получения требуемого качества поверхности), что значительно повышает себестоимость получаемых изделий. Кроме того, в РБ не освоена технология получения длинномерных труб малого диаметра из ленты.

Поэтому разработка теоретических основ и технологии получения длинномерных трубок малого диаметра для обеспечения предприятий Республики Беларусь такого типа изделиями приобретает особую актуальность.

На основании анализа технологических схем получения трубок малого диаметра предлагается комбинированный способ формообразования таких трубок из ленты, позволяющий упростить технологию их изготовления и получить качественное стыковое соединение за счет пластического деформирования сдвигом и дополнительным локальным воздействием в очаге деформации.

Качество стыкового соединения получаемых трубчатых изделий в значительной степени определяется точностью исходных полос по ширине. С целью получения точных размеров полос по ширине, отрезанных из ленты, изготовлены многодисковые ножницы. Разработанная конструкция многодисковых ножниц позволяет производить одновременную резку нескольких лент толщиной 0,15–0,5 мм из рулонов, а также обрезку лент по ширине на заданный размер.

Резка лент на многодисковых ножницах осуществляется ножами равного диаметра, вращающимися в разных направлениях с одинаковой окружной скоростью. Ножи установлены с перекрытием рабочих кромок на величину $a=(0,2-0,3)S$ для стали, латуни и $a=(0,3-0,5)S$ для мягких материалов (здесь S — толщина материала). Зазор между ножами $Z = (0,1-0,2)S$. Угол резания составляет 90° . Количество одновременно устанавливаемых пар ножей зависит от того, на какое количество полос разрезается лента, а также от мощности ножниц. Число пар ножей берется на одну больше числа лент.

Расстояние между ножами устанавливается по требуемой ширине разрезаемой ленты при помощи мерных распорных колец. Качество и точность резки достигается благодаря двухстороннему резу по всей ширине полосы и надежному прижиму металла резиновыми кольцами в процессе резки.

Предварительно на основании анализа сил, действующих при резке дисковыми ножами, и условия захвата для установившейся стадии отрезки определены минимальный диаметр ножа, обеспечивающего захват ленты при

резке [$D_{\min} > (25 \dots 30)S$] и силовые характеристики процесса резки (технологическое усилие резки P_r , момент $M_{кр}$ и мощность электродвигателя N , необходимая для привода ножниц).

Экспериментальные исследования процесса изготовления трубок малого диаметра проводили на лабораторном волочильном стане с использованием в качестве инструмента твердосплавных волок. В качестве исходной заготовки использовали полосы из нержавеющей стали X18H9T толщиной 0,2 мм. Расчет ширины полосы для каждого типоразмера изделия производили методом развертки по нейтральной поверхности деформации, используя коэффициенты смещения нейтрального слоя, значения которых зависят от относительного радиуса изгиба [1]. Исходные полосы протягивали через ряд последовательно установленных волок с определенной степенью деформации за проход с получением требуемого диаметра изделия на последнем проходе. В качестве смазочного материала использовали порошкообразные смазки.

Формообразование трубчатого изделия в процессе изготовления происходит путем одновременной свертки и волочения с обеспечением качественного стыкового соединения за счет пластического деформирования сдвигом и дополнительного локального воздействия в очаге деформации. Маршрут изготовления устанавливали в зависимости от требуемого диаметра изделия. Так, например, при изготовлении трубки с наружным диаметром 1 мм, толщиной стенки 0,2 мм из исходной полосы шириной 2,8 мм, технологический маршрут изготовления включал три прохода.

Результаты экспериментальных исследований показали возможность получения длиномерных трубок малого диаметра из ленты при хорошем качестве стыкового соединения.

Литература

1. Романовский, В.П. Справочник по холодной штамповке. 6-е изд. Л. Машиностроение, 1979. — 520 с.

УДК 678.054.2

ГРАНУЛИРОВАНИЕ ВЯЗКО-ПЛАСТИНЧАТЫХ МАТЕРИАЛОВ В РОЛИКО-КОЛЬЦЕВОЙ МЕЛЬНИЦЕ

Ложечников Е.Б., Бусел А.В., Ковалев Я.Н., Жуковин М.Г.
 Белорусский национальный технический университет,
 Республиканское Унитарное Предприятие «БелдорНИИ»
 Минск, Беларусь

Гранулами принято считать частицы или их конгломераты, размер которых не превышает 1 мм. Гранулирование (брикетирование) представляет широко распространенный способ улучшения технологических и потребительских свойств сыпучих и вязко-пластинчатых материалов. Большое число способов гранулирования основано на прокатке исходного материала в полосы, подвергаемые в дальнейшем дроблению в гранулы [1], и на одновременной прокатке и выдавливании материала через отверстия перфорированного вала с последующим срезанием выдавленных стержней. Непрерывность процесса прокатки обеспечивает высокую производительность и низкую удельную энергоемкость гранулирования. При прокатке обрабатываемый давлением материал находится в незамкнутом объеме, что снижает опасность обработки чувствительных материалов — возгорания с переходом во взрыв [2].

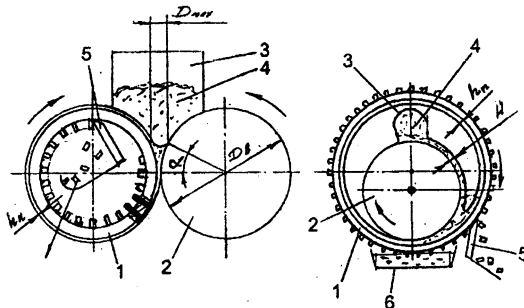


Рис. 1. Схемы валкового (а) и ролико-кольцевого (б) грануляторов

На рис. 1а, показана схема валкового гранулятора, состоящего из поло-го перфорированных 1 и сплошного 2 встречно вращающихся валков и установленного на них бункера 3, в который загружают подлежащий гранулированию материал 4. Вращающиеся валки захватывают и уплотняют материал в ленту. При этом часть материала выдавливается через отверстия перфорированного вала и срезается ножом 5. Оставшийся в

отверстиях материал обуславливает оковывание перфорированного вала. Толщина оковывающего слоя h_n равна зазору между валками. Условие захвата материала встречно вращающимися валками определяет наибольший размер D_m кусков исходного материала, зависящий от диаметра валков D_v и угла захвата a , равного углу трения материала о валки. $D_m = h_n + D_v (1 - \cos a)$, где в данном случае $a = \arctg 0,5(f + f_n)$, f и f_n – коэффициенты трения порошка о валок и о поверхность оковывающего перфорированный валок материала.

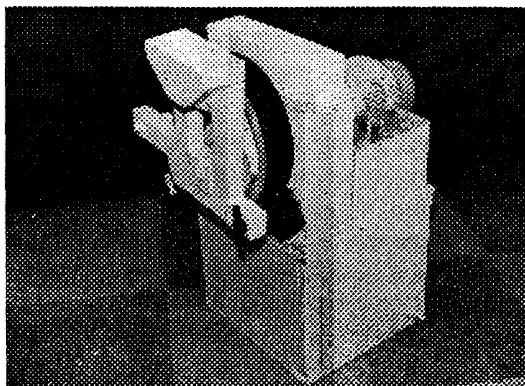


Рис. 2. Ролико-кольцевой гранулятор RT11

Проведенные эксперименты и практика гранулирования показали, что для устойчивого процесса материал перед гранулированием необходимо кусковать до размеров, не превышающих D_m или привести его в вязко-пластичное состояние нагревом или введением растворителя. При гранулировании сыпучей среды (порошка) угол захвата определяется выражением [3] $a = 0,5 (j_r + \arctg(\sin j_r / \sin j))$, где j_r и j — соответственно углы трения порошка о валки и межчастичного трения порошка.

Регулирование захвата порошка валками производится шибером, ограничивающим контакт порошка с одним из валков в пределах $a_1 < a$. Обязательным условием гранулирования порошка через перфорированный валок является введение в него пластификатора, например, раствора парафина или раствора каучука в бензине.

Настройку гранулятора (зазора между валками) на получение гранул диаметром d_p , высотой h_p следует производить исходя из следующего: толщина оковывающего перфорированный валок прессостатка h_n должна быть не более $(0,05 \dots 0,08)D_v$ и не менее $(0,3 \dots 0,4)d_p$.

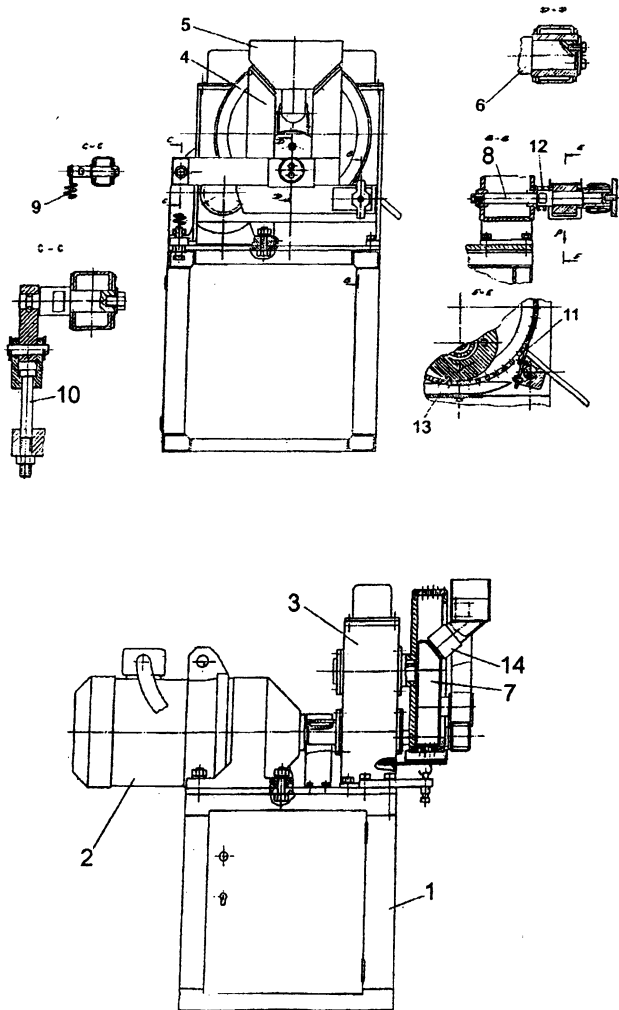


Рис. 3. Чертеж общего вида гранулятора RT11

Технические трудности, связанные с ограничениями по захвату и требованиям дозирования материала, а также со срезанием и удалением брикетов из полого вала обусловили разработку гранулятора роliko-кольцевого типа

(Рис.1,б). Во вращающемся перфорированном кольце 1 установлен с зазором h_n ролик. Бункер 3 с подлежащим гранулированию материалу 4 фиксирован относительно ролика так, чтобы материал наносился на поверхность вращающегося ролика требуемым по размерам гранул и числу отверстий в кольце слоем толщиной h_p . Попадаемый в зазор между кольцом и роликом материал обжимается, уплотняется, запрессовывается в отверстия кольца и выдавливается из них в виде стержней высотой h_s . Выдавленные стержни окунаются в ванну 6 со стабилизирующей их поверхность жидкостью, что уменьшает склонность гранул к слипаемости и слеживаемости. Стержни срезаются ножом 5 и скатываются по лотку.

Техническая характеристика гранулятора RT 11

Форма гранул		цилиндрическая
Размер гранул (в зависимости от диаметра отверстий в кольце),	мм	3-12
Перфорированное кольцо, диаметр наружный/внутренний	мм	330/310
Ширина, рабочая/наружная	мм	50/74
количество отверстий $d_2=8$ мм		240
Ролик, Диаметр/ширина	мм	178/50
Частота вращения кольца,	об/мин (c^{-1})	3,76(0,063)
Привод		мотор-редуктор 1МП,2-40-30У3
Частота вращения вала,	об/мин	28
Электродвигатель		4Ах80А6R3
мощность,	кВт	0,75
Габаритные размеры, длина/ширина/высота	мм	934/500/980
Масса,	кг	170

Гранулятор RT11 состоит (Рис.2 и 3) из сваренной из прямоугольных труб и листов тумбы 1, на которой установлены мотор-редуктор 2 и одноступенчатый цилиндрический редуктор 3. Рычаг 4 с установленным на двух его стойках бункером 5 и посаженным на ось 6 роликом 7 установлен на оси 8, закрепленной в расточке корпуса редуктора. Рычаг пружиной 9 или через

серьгу винтом 10 прижимает ролик к внутренней поверхности перфорированного кольца. На оси 8 кроме рычага посажен нож 11 с лотком. Работающая на скручивание спиральная пружина 12 прижимает заднюю кромку ножа к поверхности перфорированного кольца. Под перфорированным кольцом установлена ванна 13 со стабилизирующей поверхностью гранул жидкостью. Для поддержания повышенной температуры на патрубок бункера 5 установлен теплонагреватель 14. Настройка гранулятора на получение гранул диаметром d_p , высотой h_p осуществляется установкой шибера бункера, обеспечивающего высоту h_p слоя материала, поступаемого или наносимого на вращающейся ролик. Из условия постоянства массы $h_p = k \cdot n_2 \cdot \pi \cdot d_2^2 \cdot h_2 / 4B$, где B — ширина ролика; n_2 — число отверстий в кольце; k — коэффициент, учитывающий уплотнение материала при гранулировании.

Ролико-кольцевой гранулятор RT11 изготовлен УП «Завод политеchnik» БНТУ и находится в эксплуатации на РУП «Белдор НИИ».

Литература

1. Мурадов Г.С., Шомин И.П. Получение гранулированных удобрений прессованием. — М.: Химия, 1985. — 209 с.
2. Промышленные взрывчатые вещества на основе утилизированных боеприпасов/ Ю.Г. Шукин, Б.Н. Кутузов, Б.В. Мацоевич, Ю.А. Татищев. — М.: Недра, 1998. — 320 с.
3. Ложечников Е.Б. Прокатка в порошковой металлургии. — М.: Металлургия, 1987. — 185 с.

УДК 669.04: 548.735

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА БЫСТРОЗАТВЕРДЕВШИХ ФОЛЬГ СВИНЦА И ЕГО СПЛАВОВ С КАДМИЕМ

Шепелевич В.Г., Анисович А.Г., Шахрай О.Н.

Белорусский государственный университет,

Физико-технический институт НАНБ

Минск, Беларусь

Постоянно растущие потребности техники в новых материалах требуют глубоких исследований их структуры, знания взаимосвязи между структурой и свойствами, влияния на структуру различного рода воздействий. В настоящее время разработано новое направление в исследовании и получении ма-

териалов с благоприятным сочетанием различных свойств — сверхбыстрая закалка из расплава, при которой достигаются скорости охлаждения 10^5 К/с и выше [1]. В данной работе проводились исследования структуры и свойств быстрозатвердевших фольг свинца и его сплавов с кадмием.

Быстрозатвердевшие фольги сплавов системы Pb-Cd, содержащие до 28 ат. % Cd, получены при затвердевании капли расплава ($\approx 0,2$ г), инжесктированной на внутреннюю полированную поверхность быстровращающегося медного цилиндра. Образцы получались в виде тонкой фольги. Сторона фольги, контактирующая с кристаллизатором, имела зеркальный вид, а противоположная сторона, контактирующая с атмосферой, была бугристой. Металлографический анализ проводился с помощью микроскопа Neophot-21. Рентгеноструктурные исследования проводились на дифрактометре ДРОН-2 в медном излучении. Текстура фольг исследована методом обратных полюсных фигур. Полюсная плотность ρ_{hkl} дифракционных линий 111, 200, 220, 311, 331 и 420 рассчитана по методу Харриса [2]. Микротвердость измерялась с помощью прибора ПМТ-3. Исследования проводились при нагрузке 10 г для всех образцов, время выдержки нагрузки 15 с. Относительная ошибка измерения микротвердости составляет 3 %.

Таблица 1

**Значения полюсных плотностей дифракционных линий
быстрозатвердевших фольг системы Pb-Cd**

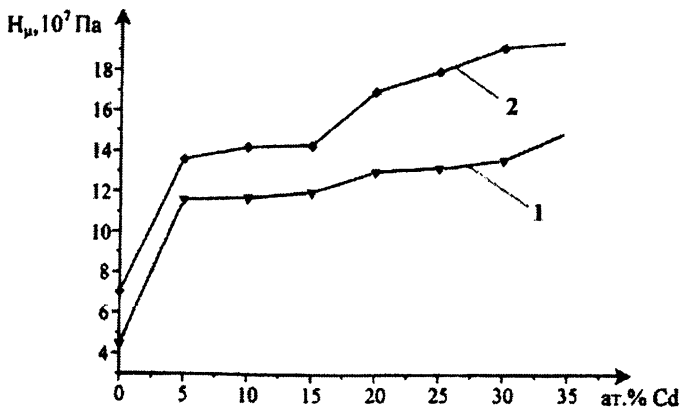
hkl	ρ_{hkl}				
	Pb	Pb- 5ат.%Cd	Pb- 10ат.%Cd	Pb- 20ат.%Cd	Pb- 28ат.%Cd
111	4,4	4,0	4,0	4,4	4,4
200	0,9	0,5	0,5	0,4	0,5
220	0,1	0,4	0,4	0,4	0,5
311	0,3	0,6	0,5	0,4	0,4
331	0,1	0,2	0,2	0,2	0,1
420	0,2	0,3	0,4	0,2	0,1

Быстрозатвердевшие фольги свинца и сплавов системы Pb-Cd имели микрокристаллическую структуру. Если в массивном образце чистого свин-

ца средний размер зерна достигает 80 мкм, то в быстрозатвердевшей фольге не превышает десяти микрон. При этом легирование свинца кадмием приводит к уменьшению среднего размера зерен в быстрозатвердевших фольгах. Для сплава Pb-10 ат. % Cd средний размер выделений второй фазы (твердого раствора на основе кадмия) в массивном образце составляет 25 мкм, а в быстрозатвердевшей фольге 7 мкм.

В таблице 1 приведены значения полюсных плотностей дифракционных линий исследуемых фольг. Наибольшим значением полюсной плотности характеризуется дифракционная линия 111. На долю данной ориентировки приходится 65-85 % объема фольги.

Из плоскостей $\{111\}$ и $\{100\}$ наиболее плотноупакованными являются плоскости $\{111\}$, а наименьшей поверхностной энергией характеризуются плоскости $\{100\}$. Поэтому при условиях кристаллизации, близких к равновесным, энергетически выгодным является формирование текстуры (100). При затвердевании в сильно неравновесных условиях текстура определяется теми зернами, у которых при плоском фронте кристаллизации межфазная граница «кристалл-жидкость» совпадает с плоскостью, растущей с наибольшей скоростью. Энергетический барьер перемещения межфазной границы, совпадающей с плоскостями $\{111\}$ меньше, чем для межфазной границы, совпадающей с плоскостями $\{100\}$ [3]. Вследствие этого при быстром затвердевании предпочтителен рост зерен, у которых плоскости $\{111\}$ перпендикулярны направлению теплоотвода, формируя тем самым текстуру (111) в быстрозатвердевших фольгах свинца и его сплавах с кадмием.



Зависимость микротвердости фольг (1) и массивных сплавов (2) системы свинец-кадмий от концентрации кадмия

Результаты измерения микротвердости сплавов системы Pb-Cd представлены на рисунке. Микротвердость сплавов зависит от концентрации кадмия. При этом микротвердость фольг всех исследуемых сплавов меньше микротвердости массивных образцов и повышается с увеличением процентного содержания легирующего элемента.

Увеличение микротвердости свинца при легировании объясняется образованием твердого раствора на его основе и выделением мелкодисперсных частиц второй фазы на основе кадмия [4]. Меньшее значение микротвердости фольг, чем массивных образцов, можно объяснить измельчением зеренной структуры. Известно [5], что в металлах границы зерен при температурах $T \approx 0,5 T_m$ и выше (T_m — температура плавления по шкале Кельвина) являются разупрочненными зонами, и возможно зернограничное проскальзывание.

Отжиг фольг свинца при 240°C в течение 1 часа приводит к увеличению среднего размера зерна до 12 мкм, что объясняется процессами рекристаллизации.

В таблице 2 приведены значения полюсных плотностей для фольг сплавов Pb-5 ат. % Cd и Pb-10 ат. % Cd, отожженных при температуре 240°C в течение 1 часа.

Таблица 2

**Значения полюсных плотностей дифракционных линий
быстрозатвердевших фольг системы Pb-Cd**

hkl	P_{hkl}	
	Pb-5 ат. % Cd	Pb-10 ат. % Cd
111	2,2	2,3
200	1,1	1,1
220	0,3	1,0
311	1,0	0,9
331	0,6	0,4
420	0,8	0,3

После отжига фольг полюсная плотность дифракционной линии 111 уменьшается, полюсные плотности остальных линий незначительно увеличиваются. Наблюдается ослабление текстуры (111), обусловленное протеканием рекристаллизационных процессов.

При температуре 100 °С происходит увеличение микротвердости фольг чистого свинца (в 1,2 раза), микротвердость фольг Pb-5 ат. % Cd, Pb-10 ат. % Cd остается неизменной. После отжига при температуре 240 °С наблюдается увеличение микротвердости всех исследуемых фольг (в 1,5 раза). Увеличение микротвердости фольг свинца при отжиге целесообразно связать с протеканием рекристаллизационных процессов, вызывающих рост среднего размера зерен и уменьшение площади межзеренных границ. В фольгах сплавов Pb-Cd выделения второй фазы задерживают протекание рекристаллизации. Поэтому их отжиг при температуре 100 °С не изменяет микротвердость. Но при последующем отжиге при температуре 240 °С рекристаллизационные процессы все же происходят, обуславливая увеличение среднего размера зерна и повышение микротвердости.

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы.

1. Быстрозатвердевшие фольги свинца и его сплавов с кадмием имеют мелкодисперсную структуру и текстуру (111).

2. Микротвердость быстрозатвердевших фольг системы Pb-Cd увеличивается с повышением концентрации кадмия и по величине меньше микротвердости массивных литых сплавов.

3. Отжиг приводит к укрупнению зеренной структуры, ослаблению текстуры (111) и увеличению микротвердости быстрозатвердевших фольг свинца и его сплавов с кадмием.

Литература

1. Мирошниченко И.С. Закалка из жидкого состояния. – М.: Metallurgia, 1982. – 168 с.

2. Вассерман Г., Гривен И. Текстуры металлических материалов. – М.: Metallurgia, 1969. – 656 с.

3. Li D.Y., Szpunar J.A. J. of Materials Science Letters. 1994. V.13. P.1521.

4. Тофленец Р.Л. Разупрочняющие процессы в стареющих сплавах. – М.: Наука и техника, 1979. – 184 с.

5. Хоникомб Р. Пластическая деформация металлов. – М.: Мир, 1972. – 408 с.

УДК 621.762

РАЗРАБОТКА МНОГОСЛОЙНЫХ РЕГЕНЕРИРУЕМЫХ ФИЛЬТРОЭЛЕМЕНТОВ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ

Петюшик Е.Е., Азаров С.М., Макарчук Д.В.

Белорусский национальный технический университет

Минск, Беларусь

Проблема очистки жидкостей и газов от механических примесей актуальна в различных областях техники и жизнедеятельности человека. Особую задачу представляет вызванная ухудшением экологической обстановки необходимость очистки питьевой воды. Различные системы очистки воды жилых домов, коттеджей, детских и здравоохранительных учреждений, пунктов питания, пищевых предприятий используют соответственно различные по конструкции фильтроэлементы из широкого круга материалов, в том числе порошковых (от керамики и металла до различного рода полимеров и других органических материалов).

Однако разнообразие применяемых устройств и материалов не в состоянии удовлетворить все требования потребителей по ряду параметров, особенно при необходимости очистки большого количества воды. Так, практически отсутствуют приемлемые решения по очистке воды от примесей растворенного железа до уровня ПДК, бактериологических загрязнений, солей тяжелых металлов и т.д. на производительность свыше $2 \text{ м}^3/\text{час}$ и ресурсом работы $1000\text{--}1500 \text{ м}^3$. Это определяет потребность в разработке как новых фильтрующих устройств, так и эффективных фильтрующих элементов и технологии их производства.

Как следствие требований, предъявляемых к эксплуатационным свойствам фильтроэлементов, при разработке их конструкций ставятся задачи совмещения в одном изделии взаимно противоположных свойств: высокой производительности и минимальных размеров, высокой проницаемости и малого размера пор, высокой пористости и высокой прочности, достаточной грязеемкости и возможности регенерации.

Производительность фильтрующего элемента лимитируется площадью его рабочей поверхности и проницаемостью. Площадь рабочей поверхности может быть увеличена за счет ее усложнения при сохранении габаритных размеров элемента [1]. Повышение проницаемости достигается либо увеличением открытой пористости и размера пор, либо снижением гидравлического сопротивления материала за счет уменьшения извилистости пор и шероховатости их поверхности [2], а также толщины стенки фильтроэлемента.

Увеличение размера пор приводит к снижению тонкости очистки, что часто неприемлемо. Извилистость пор уменьшают упорядочением структуры материала, что для порошковых материалов весьма проблематично. Уменьшение толщины стенки снижает прочность и грязеемкость фильтроэлемента. Уменьшение шероховатости поверхности пор возможно при использовании порошков с формой частиц, приближающейся к сферической, что не всегда целесообразно из соображений минимизации стоимости самого материала порошка и технологии изготовления фильтрующего элемента. Прочностные свойства фильтрующего элемента определяются каркасными характеристиками, главным образом – плотностью, качеством межчастичных контактов, физико-механическими свойствами материала порошка, размерами элемента. Уменьшение плотности, как и утонение стенки, приводит к снижению прочностных свойств элемента. Кроме того, предельная пористость порошковых изделий в значительной степени определяется технологической операцией прессования и, обычно, не превышает 50–55% из условия прочности прессовки после процесса прессования. Грязеемкость фильтрующего элемента зависит от объема материала элемента. Для обеспечения высокой грязеемкости требуется использовать относительно массивные изделия, что увеличивает их материалоемкость и затрудняет процесс регенерации.

Анализ указанных противоречий позволил сформулировать основные требования к вновь проектируемым фильтрующим элементам и определить возможные пути их конструктивной реализации.

1. Увеличение рабочей поверхности за счет ее усложнения. Для ряда материалов технические решения такого усложнения известны (гофрирование, сборные конструкции порошковых изделий и т.п.). Более технологичным представляется изготовление цельных элементов сложной формы из порошковых материалов [3].

2. Обеспечение требуемой тонкости очистки посредством управления размером пор при изготовлении. Реализуется использованием порошков различных фракций с узким диапазоном разброса размеров частиц.

3. Увеличение проницаемости за счет минимизации толщины фильтрующего слоя. Требование очевидно, но предполагает существование каких-либо дополнительных конструктивных элементов для обеспечения прочности и жесткости.

4. Обеспечение требуемой прочности элемента. Возможно при изготовлении его многослойным, когда функции фильтрования выполняет один или несколько фильтрующих слоев, а прочность обеспечивается специальным слоем – каркасным, не снижающим проницаемость фильтрующего элемента в целом за счет большего размера пор.

5. Увеличение жесткости элемента выбором оптимальной геометрической формы поверхности, которая лимитируется и технологическими ограничениями в процессе его формообразования (прессования). Осевая жесткость может быть обеспечена наличием продольных ребер, а радиальная — цилиндрической поверхностью.

6. Обеспечение значительной грязеемкости фильтрующего элемента. Возможно за счет массивного крупнопористого слоя подложки.

7. Создание благоприятных предпосылок для регенерации элемента. В однородных пористых материалах сквозная пора схематично может быть представлена в виде извилистого канала относительно постоянного сечения. В многослойных материалах при закономерном уменьшении размера пор от слоя к слою сечение канала соответственно уменьшается. При направлении регенерирующего потока жидкости (газа) в сторону увеличения сечения пор процесс регенерации облегчается.

На основе изложенных выше представлений разработана конструкция эффективного многослойного фильтрующего элемента (рис. 1), технология его изготовления из порошков титана и фарфора и оригинальный деформирующий инструмент [4].

Фильтрующий элемент содержит внутренний (каркасный) слой 1, имеющий наибольший средний размер пор, причем внутренняя поверхность А этого слоя выполнена цилиндрической, а наружная В — ребристой с произвольной формой профиля ребра, m промежуточных фильтрующих слоев 2, 3, и мембранный слой 4, имеющих постоянную толщину, уменьшающуюся от слоя к слою. Средний размер пор и толщина каждого последующего слоя, начиная от каркасного, на порядок меньше среднего размера пор и толщины предыдущего слоя.

В качестве лимитирующего сечения каркасного слоя 1 принимается сумма площадей F_k . Если количество ребер каркасного слоя n , то площадь $\sum_n F_k$ при толщине слоя h_1 должна обеспечивать расход фильтрата не меньший, чем расход, обеспечиваемый наименее проницаемым из остальных слоев (наружным) через площадь $\sum_n F$. Для минимизации потерь давления фильтруемой среды, проходящей через фильтрующий элемент и рационального использования порошковых материалов при изготовлении фильтрующего элемента целесообразно выбирать толщину слоев $h_1 > h_2 > h_3 > \dots > h_m$ таким образом, чтобы все слои, кроме каркасного слоя 1, обеспечивали приблизительно одинаковый расход.

Многослойные фильтроэлементы имеют в 3–5 раз большую производительность по сравнению с однородными при том же рабочем давлении и в 1,4–2,5 раза большую грязеемкость. В зависимости от требуемой тонкости

очистки число слоев может изменяться. Минимальное количество слоев — 2. С возрастанием требований к тонкости очистки количество слоев увеличивается и строго не регламентировано.

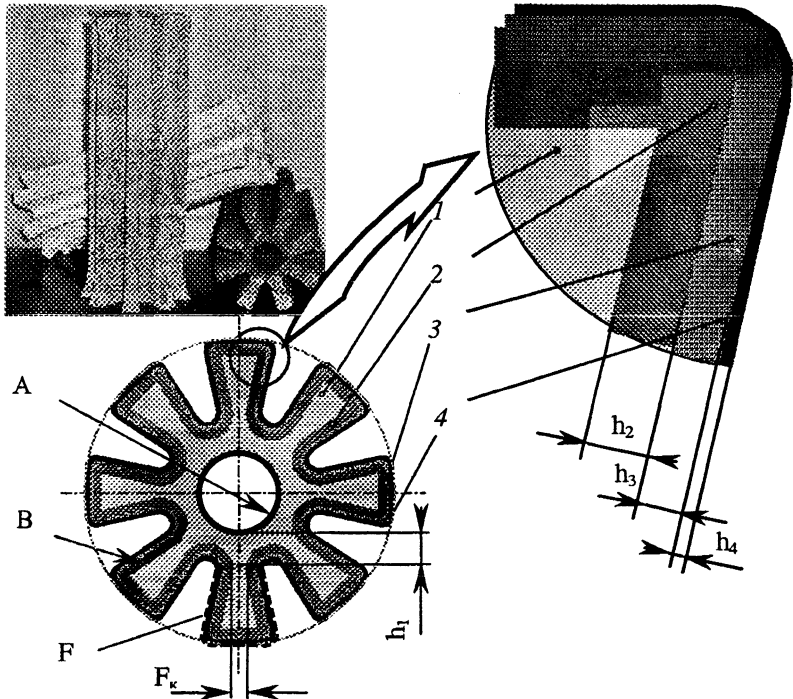


Рис. 1. Вид фильтрующих элементов и схема поперечного сечения

На рис. 2 представлена структура двухслойного фильтроэлемента, изготовленного из порошка фарфора. Каркасный слой имеет размер пор 100–150 мкм, фильтрующий слой — 3–10 мкм.

Каркасный слой, изготовленный способом сухого изостатического прессования, выполняет функцию накопителя загрязнений, несет основные монтажные и эксплуатационные нагрузки фильтрующего элемента, а также является подложкой для второго слоя. Большой размер пор каркасного слоя обеспечивает его высокую проницаемость при значительной толщине стенки. Значительный объем материала каркасного слоя способствует достаточ-

но высокой прочности всего фильтрующего элемента, что обеспечивает его работу при более высоких перепадах давления фильтруемой среды с соответствующим повышением производительности. Фильтрующий слой наносится на спеченный каркасный слой с использованием методов коллоидной химии с последующим спеканием. Он обеспечивает лишь требуемую тонкость очистки и не является несущим.

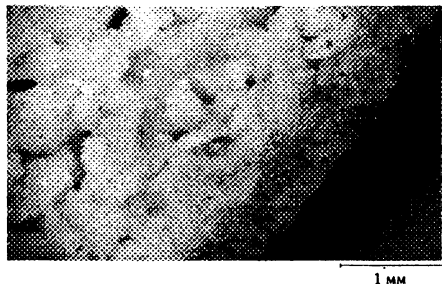


Рис. 2. Пористая структура 2-слойного фильтроэлемента

Использование таких фильтроэлементов позволяет приблизиться к решению проблемы сочетания качества очистки с достаточной производительностью и эффективной регенерацией.

Литература:

1. Оптимизация формы и размеров порошковых пористых изделий / Богинский Л.С., Петюшик Е.Е., Реут О.П., Куличенков В.П. // Порошковая металлургия, Киев, 1996, № 11-12, - С. 80-84.
2. Агте К., Оцетек К. Металлокерамические фильтры, их изготовление, свойства и применение. —Л.: Судпромгиз, 1959. — 136 с.
3. Theoretical and Technological Fundamentals of Pressing Porous Powder Articles of the Complex Shape / O. Reut, Y. Piatsiushyk, D. Makarchuk, A. Yakubouski. // 15 International Plansee Seminar, Austria, Reutte, 2001, V 3, P. 271–284.
4. Пат. 1 С1 ВУ, МПК⁶ В 22F 3/02. Прессформа для прессования изделий из порошков / Петюшик Е.Е., Макаρχук Д.В. №4364; Заявл. 18.03.1999; Опубл. 30.06.2002 // Афіцыйны бюлетэнь / Дзярж. пат. ведамства Рэсп. Беларусь.— 2002.— № 2 (33).— С. 46.

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ИНФОРМАТИКА

УДК 621.822

КИНЕМАТИКА ШАРИКОВ ПРИ ОБРАБОТКЕ МЕЖДУ СООСНЫМИ ДИСКАМИ И КОЛЬЦОМ

Щетникович К.Г., Балашова О.В., Петренко И.Ф.
*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

Шлифование и доводка шариков из хрупких и неметаллических материалов традиционным способом между двумя дисками в кольцевых канавках [1] вызывает большие технологические трудности, связанные с возможностью повреждения поверхностного слоя заготовок вследствие высоких контактных напряжений, возникающих на площадках соприкосновения заготовок с инструментом. Снизить динамические нагрузки можно путем уменьшения усилия прижатия и скорости вращения инструмента, но тогда значительно уменьшается и скорость съема припуска, так как резание материала происходит в условиях трения качения с незначительным дифференциальным проскальзыванием. Кроме того, при малых скоростях вращения инструмента положение мгновенной оси вращения шарика изменяется медленно, что отрицательно сказывается на точности обработки.

Простота реализации и постепенная взаимная приработка рабочих поверхностей инструмента и обрабатываемых шариков являются важными преимуществами способа обработки шариков между соосными дисками. В то же время низкая скорость проскальзывания шариков относительно рабочих поверхностей инструмента и медленное изменение положения мгновенной оси вращения шарика в зоне обработки ограничивают область применения данного метода.

Для увеличения скорости проскальзывания в устройствах [2,3] боковые стороны канавки выполнены в виде отдельных колец с независимым приводом. Использование этих устройств значительно расширяет возможности изменения кинематики шариков, так как обработка их происходит между тремя поверхностями, имеющими разные угловые скорости. Однако устройства конструктивно сложны и отрицательное влияние на точность шариков будет оказывать относительное биение приводных колец, установленных на разных шпинделях.

Более простую конструкцию имеет устройство [4] для обработки шариков между соосно установленными дисками и кольцом, свободно устанавливаемым на обрабатываемые шарики. В предлагаемом устройстве (рис. 1) шарики 9 обрабатываются между нижним приводным диском 2, верхним

приводным диском 5 с конической фаской 6 и кольцом 3, на внутренней поверхности которого выполнена кольцевая проточка 4. Для фиксации кольца 3 от вращения вдоль его наружной цилиндрической поверхности выполнен паз 7, в который входит неподвижный палец 8. Нижний диск 2 установлен на оправке 1 с помощью опорного шарика 11 и получает вращение от поводка 10. В зазоре между дисками может быть установлен сепаратор для размещения шариков (на рисунке не показан).

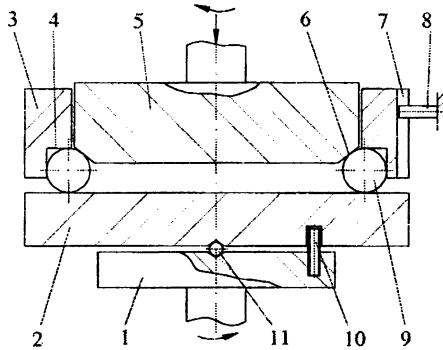


Рис. 1. Схема устройства для обработки шариков между соосно установленными дисками и кольцом

Осевая нагрузка прикладывается к верхнему диску, который конической поверхностью прижимает шарики к нижнему диску и боковой поверхности кольцевой проточки. Дополнительная нагрузка, действующая на обрабатываемые шарики, обусловлена весом кольца. Нижний диск при обработке устанавливается параллельно торцевой поверхности верхнего диска за счет шарового шарнира. Кольцо базируется по обрабатываемым шарикам и в процессе обработки самоустанавливается в осевом и радиальном направлениях, вследствие чего значительно снижается влияние биения рабочих поверхностей инструмента на точность шариков. Общее число площадок контакта шарика с инструментом четыре и расположены они несимметрично, поэтому перемещение шарика вдоль кольцевой канавки сопровождается значительным проскальзыванием относительно одной из поверхностей инструмента.

Теоретический анализ кинематики шарика в зоне обработки (рис. 2) базируется на следующих допущениях: контакт шарика с рабочими поверхностями инструмента происходит в точках и проскальзывание в них отсутствует за исключением точки контакта шарика с горизонтальной поверхностью

кольцевой проточки (точка C). Второе допущение правомочно, так как нагрузка на верхний диск превышает вес кольца. Введем следующие обозначения: ω_n , ω_s — угловые скорости нижнего и верхнего дисков соответственно; α — угол конической фаски на верхнем диске; R — расстояние от центра шарика до оси вращения дисков; r — радиус шарика.

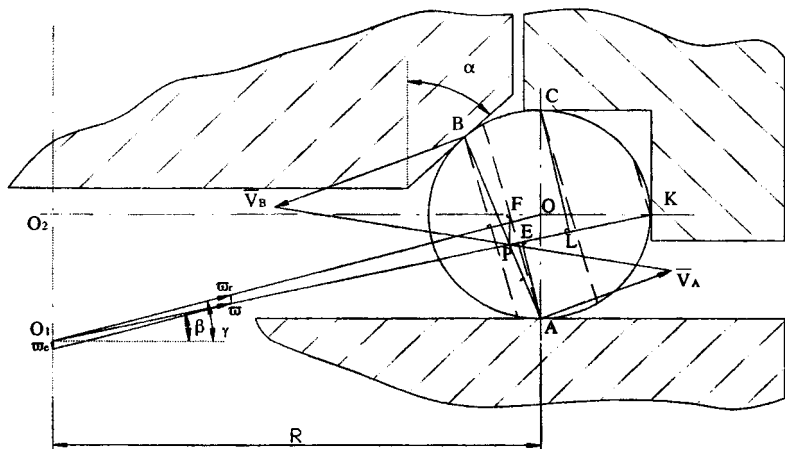


Рис. 2. Кинематика шарика в зоне обработки

Мгновенная ось абсолютного вращения шарика проходит через точку K на неподвижном кольце и точку P , которая является полюсом скоростей точек A и B . Точка P делит отрезок AB на части пропорциональные линейным скоростям дисков V_A и V_B в точках A и B .

$$AP = \frac{AB \cdot V_A}{V_A + V_B} = \frac{\sqrt{2}\omega_n R r (\cos \alpha + \sin \alpha)}{\omega_n R + \omega_s (R - r \cos \alpha)}$$

Выполнив необходимые геометрические построения можно получить аналитические выражения для расчета кинематики шарика. Угол β наклона мгновенной оси абсолютного вращения шарика определяется из ΔPFK

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{\omega_s (R - r \cos \alpha) - \omega_n R \sin \alpha}{\omega_s (R - r \cos \alpha) + \omega_n R (1 + \cos \alpha)}$$

Величина угла γ наклона мгновенной оси относительного вращения шарика определяется из ΔOO_1O_2

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{R+r}{R} \operatorname{tg} \beta .$$

Для нахождения значения абсолютной угловой скорости шарика определим вначале расстояние от точки A до вектора $\vec{\omega}$ из ΔAPE

$$AE = AP \cos\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\alpha}{2} - \beta\right) = \frac{\omega_n R r [\cos \beta + \sin(\alpha + \beta)]}{\omega_n R + \omega_e (R - r \cos \alpha)} .$$

Абсолютная угловая скорость шарика равна

$$\omega = \frac{V_A}{AE} = \frac{\omega_n R + \omega_e (R - r \cos \alpha)}{r [\cos \beta + \sin(\alpha + \beta)]} .$$

Относительная ω_r и переносная ω_e угловые скорости шарика определяются из треугольников, построенных на векторах угловых скоростей шарика

$$\omega_r = \frac{\omega \cos \beta}{\cos \gamma} ; \quad \omega_e = \frac{\omega r \sin \beta}{R} .$$

Скорость проскальзывания шарика относительно горизонтальной поверхности кольцевой проточки (в точке C) вычисляется по формуле

$$V_C = \omega \cdot CL = \omega r (\sin \beta + \cos \beta)$$

Следы на поверхности шарика от контакта с инструментом представляют собой окружности, расположенные в параллельных плоскостях, перпендикулярных вектору $\vec{\omega}$. На рис. 2 следы контакта показаны пунктирными линиями.

Анализ полученных выражений позволил установить, что противоположное вращение дисков обеспечивает большую скорость вращательного движения шариков и, следовательно, более быстрое нанесение следов обработки на их сферическую поверхность. При небольших различиях величин угловых скоростей дисков скорость поступательного перемещения шариков мала, что позволяет уменьшать динамические нагрузки, возникающие при их контакте с сепаратором. Увеличение скорости вращения верхнего диска в большей степени влияет на максимальную скорость проскальзывания, чем увеличение скорости нижнего диска. Теоретические результаты хорошо согласуются с величинами угловых скоростей переносного вращения шариков, определенных экспериментально. Расхождение не превышает 20%.

Рассмотренный характер движения является преобладающим при перемещении шариков в рабочей зоне. На кинематику шарика влияют также его отклонение от сферической формы, приводящее к изменению давления по площадкам контакта с инструментом. Шарик в канавке может занять такое положение при котором давление по площадкам контакта B и K будет меньше, чем по площадкам A и C . Условия контакта шарика с инструментом в этот момент близки к двухточечному и мгновенная ось вращения займет приблизительно горизонтальное положение.

Помимо отклонения от сферической формы шарика на изменение положения его мгновенной оси вращения влияют радиальное и торцевое биение дисков и погрешности рабочих поверхностей инструмента. Сочетание всех этих факторов обеспечивает непрерывное изменение положения вектора $\vec{\omega}$, и, следовательно, быстрое нанесение следов обработки на поверхность шарика.

Большая скорость проскальзывания шариков в рабочей зоне дает возможность снизить усилие прижима верхнего диска при сохранении достаточной скорости съема припуска. Снижение контактных напряжений позволяет обрабатывать шарики из хрупких неметаллических материалов. Экспериментальные исследования показали высокую эффективность метода обработки при шлифовании точных шариков, изготовленных из стекла и минерального сырья.

Литература

1. Окончательная беззеваторная доводка шариков I и 0 степеней точности по ГОСТ 3722-60: Обзор / С.П. Байков, Д.А. Пучков, Н.К. Бурчакова, З.П. Архангельская. — М.: НИИН Автопром, 1973-86с. 2. Пат. 3984945 США, МКИ В24В 11/06. Устройство для доводки шариков / Клаус Массершмидт. №2202098; Заявл. 18.01.72; Оpubл. 12.10.76 // Изобретения за рубежом. — 1977. — № 4. С. 29. 3. Заявка 3 — 178771 Япония, МКИ В24В 37/02. Устройство для обработки шариков / Макото Анодо. — № 65 — 204846; Заявл. 30.07.90; Оpubл. 02.08.91.

4. Пат. 1969 Беларусь, МКИ В24В 11/02. Устройство для обработки шариков / К.Г. Щетникович. — № 1836; Заявл. 29.03.94; Оpubл. 30.12.97 // Официальный бюллетень. — 1997. № 4 (ч.1). С. 120.

УДК 389:687.03

ПРИБОР ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ ЭЛАСТИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ШВОВ

Буркин А.Н., Матвеев К.С., Махонь А.Н., Терентьева О.А.
Витебский государственный технологический университет
Витебск, Беларусь

Эксплуатационные свойства обуви характеризуются устойчивостью материалов к многократным изгибам и растяжениям, износостойкостью ниточных, клеевых и сварных соединений, изменением прочности и жесткости после динамических нагрузок. В качестве обувных материалов верха применяют натуральные, синтетические и искусственные кожи, текстильные материалы и системы, состоящие из них.

Авторами разработана техническая документация и изготовлен прибор, который предназначен для оценки эксплуатационных свойств материалов для верха обуви и соединительных швов в динамических условиях. Прибор способен моделировать реальные условия носки обуви, а именно распорное действие стопы, сопровождающееся одновременным изгибом и растяжением материалов верха обуви.

Известен прибор для динамического испытания ниточных швов заготовок верха обуви путем деформации образцов [1]. Образцы цилиндрической формы закрепляются на деформационном узле, выполненном в виде коленчатого вала с запрессованными на нем подшипниками, подвергаются многократному изгибу с растяжением для определения механических свойств ниточных швов.

Данный прибор, в силу особенностей приемов осуществления динамических нагрузок, не обеспечивает высокой достоверности результатов испытаний, т. к. не отражает реального характера нагружения переднего отдела верха обуви. Прибор дает удовлетворительное качество оценки ниточных швов и не приемлем для оценки эксплуатационных свойств эластичных материалов.

Преимуществом разработанного авторами прибора является расширенная функциональная возможность и высокая достоверность оценки эксплуатационных свойств разнообразных обувных материалов и их соединений.

На рис. 1 представлен общий вид прибора сверху. Прибор состоит из платформы 1, на которой установлен привод 2, приводящийся в движение от электродвигателя 3; цилиндрического устройства 4, один конец которого закреплен на валу привода, а другой — на опоре 5. Опора может быть закреплена на платформе под углами 30°, 60°, 90°, изменяя угол изгиба образца. Для

установления давления внутри цилиндрического устройства служит манометр 6; для установления частоты деформации — счетчик оборотов 7.

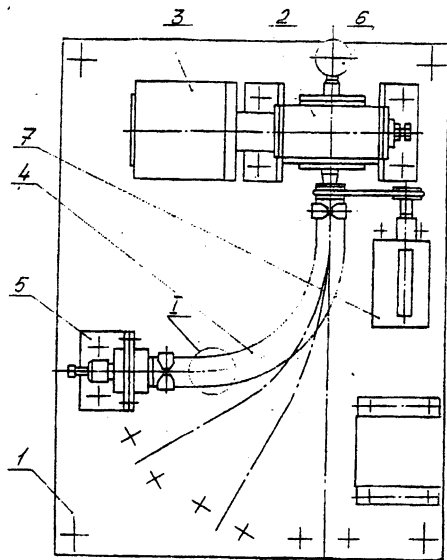


Рис. 1. Общий вид прибора

Конструктивное решение цилиндрического устройства представлено на рис. 2. Оно состоит из рукава 8 с отверстиями по всей длине, расположенного внутри резиновой трубки 9, концы которых склеены между собой.

Работает прибор следующим образом. Образец материала цилиндрической формы (с продольным швом) надевается на цилиндрическое устройство и закрепляется при помощи зажимов. Устройство заполняется воздухом под давлением, соответствующем давлению в системе «стопа — обувь, тело человека — облегающие одежды.

Приводной механизм, состоящий из двигателя асинхронного типа и редуктора, приводит во вращательное движение цилиндрическое устройство с образцом. Меняя положение опоры, можно менять угол изгиба. Деформация образцов на приборе осуществляется путем многократного изгиба с одновременным растяжением образцов по всей поверхности в поперечном направлении. Давление воздуха внутри устройства может варьироваться, что

наряду с изменением скорости вращения (частоты деформации) и углом изгиба имитирует различные условия носки.

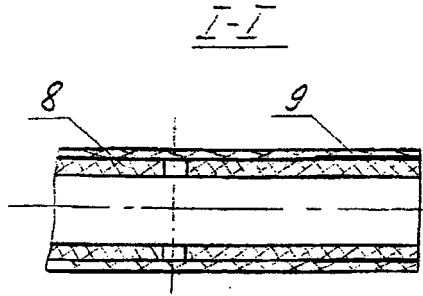


Рис. 2. Цилиндрическое устройство

Поставленная задача оценки эксплуатационных свойств эластичных материалов и их соединений достигается путем измерений площади образца, характера складкообразования и суммарной величине складок, прочности, жесткости, величине нагрузки при расслаивании основы с покрытием (для дублированных материалов).

Таким образом, описанные конструктивные характеристики прибора обеспечивают необходимые условия для:

- достоверности результатов испытаний эластичных материалов и швов в динамических условиях;
- оценки износостойкости ниточных, клеевых и сварных швов, адгезии основы с покрытием;
- оценки формоустойчивости и износостойкости материалов верха обуви;
- прогнозирования эксплуатационных показателей качества обуви.

Литература

1. Новое в конструировании и технологии изготовления обуви типа мокасин. /А.Н. Буркин, К.Ф. Потапова, М.П. Чумакова, Л.П. Круглякова. — М.:ЦНИИТЭИлегпром, 1998 - 40 с. (сер. «Обувная промышленность». Обзорная информация. Выпуск 3) / с.21–23. рис.6

УДК 621.822.76

ИЗМЕРЕНИЕ УРОВНЯ ВИБРАЦИЙ ШАРИКОПОДШИПНИКОВ

Минченя Н.Т., Савченко А.Л.

Белорусский национальный технический университет

Минск, Беларусь

Согласно ГОСТ 4.479-87 показатели качества подшипников разбиты на 7 групп:

1. Показатели назначения.
2. Показатели надежности.
3. Показатели экономного использования материалов и энергии.
4. Эргономические показатели.
5. Показатели технологичности.
6. Показатели стандартизации и унификации.
7. Патентно-правовые показатели.

Для оценки работоспособности подшипника в первую очередь используются показатели из 1-й группы, т. е. показатели назначения. Они по ГОСТ 4.479-87 предусматриваются следующие:

1. Динамическая грузоподъемность C, H (определяется по ГОСТ 18855-82).
2. Статическая грузоподъемность C_0, H_0 (определяется по ГОСТ 18854-82).
3. Уровень вибрации N, dB (определяется по ГОСТ 23941-71).
4. Предельная частота вращения n, c^{-1} (определяется по ГОСТ 20918-75).
5. Габаритные размеры $\delta \times D \times B$.
6. Класс точности по ГОСТ 520-89.
7. Категория по нормируемым свойствам по ГОСТ 520-89.
8. Остаточная намагниченность $H, A/m$.
9. Отклонение угла контакта $\Delta\alpha, град$.

Уровень вибрации косвенно характеризует точность вращения подшипника и часто используется для сравнительной комплексной оценки качества при выполнении сборочных работ.

Согласно ГОСТ 520 уровень вибрации подшипников контролируют в трех частотных полосах 50–300, 300–1800 и 1800–10000 Гц по вибрационной скорости наружного невращающегося кольца при вращении внутреннего с частотой 25 ... 30 c^{-1} ; допускается контроль общего уровня вибрации по вибрационным скорости или ускорению в диапазоне частот от 50 до 10000 Гц, а также контроль в трех частотных полосах по вибрационному ускорению.

В производственных условиях контроль вибраций подшипников производится на стендах и испытательных машинах, позволяющих проводить ком-

плексные испытания подшипников с измерением большого количества параметров при различных условиях. В сборочном цеху необходимость в таких комплексных или ресурсных испытаниях отсутствует, поэтому имеется потребность в простых и надежных средствах измерения отдельных параметров, в том числе уровня вибраций. Авторами разработано подобное устройство, имеющее простую конструкцию и удобное в использовании.

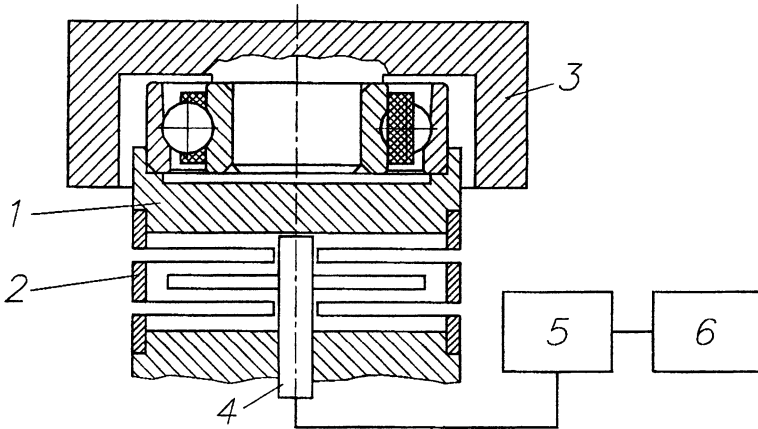


Рис. 1. Схема устройства для измерения уровня вибраций

Разработанное устройство, схема которого показана на рисунке 1, позволяет производить контроль общего уровня вибрации по вибрационному ускорению. Контролируемый подшипник устанавливается наружным кольцом в оправку 1, жестко связанную с цилиндрической прорезной пружиной 2. Во внутреннее кольцо подшипника устанавливается оправка 3, являющаяся сейсмической массой. Масса оправки 3 и жесткость пружины 2 подобраны так, чтобы собственная частота упругой системы составляла около 100000 Гц, что позволяет контролировать уровень вибраций в заданной полосе частот. Внутреннее кольцо приводится во вращение потоком воздуха от компрессора (на рисунке не показан), для чего оправка 3 имеет специальные отверстия. Вызванные вибрациями подшипника деформации пружины 2 измеряются бесконтактным индуктивным датчиком 4, подключаемым к прибору 5 типа БИМП-2. Сигнал с выхода БИМП-2 поступает на анализатор спектра 6.

УДК 621.822.76

ИЗМЕРЕНИЕ МОМЕНТА ТРЕНИЯ В РАДИАЛЬНО-УПОРНЫХ ШАРИКОПОДШИПНИКАХ

Минченя Н.Т., Савченко А.Л.

Белорусский национальный технический университет

Минск, Беларусь

Трение в подшипниках качения является основной причиной энергетических потерь, выражающихся в снижении КПД механизма. Особенно это актуально для высокоскоростных опор, так как энергия, затраченная на преодоление сил сопротивления, выделяется в подшипнике в виде тепла, что приводит к снижению срока службы опоры. В приборах точной механики трение в опорах приводит к появлению нелинейностей статической характеристики, таких как, например, зона нечувствительности. Момент трения состоит из следующих компонентов [1]:

$$M_{\text{тр}} = M_{\text{ск}} + M_{\text{гир}} + M_{\text{гис}} + M_{\text{от}} + M_{\text{сеп}} + M_{\text{см}} + M_{\text{ср}} + M_{\text{тем}}$$

где $M_{\text{ск}}$ — составляющая, вызванная дифференциальным проскальзыванием на площадках контакта; $M_{\text{гир}}$ — составляющая, вызванная гироскопическим вращением тел качения; $M_{\text{гис}}$ — составляющая, вызванная потерями на упругий гистерезис в материалах контактирующих тел; $M_{\text{от}}$ — составляющая, вызванная отклонением деталей подшипника от правильной геометрической формы и микрогеометрией контактирующих поверхностей; $M_{\text{сеп}}$ — составляющая, вызванная трением между сепаратором и другими деталями подшипника; $M_{\text{см}}$ — составляющая, вызванная сдвигом и сбросом смазки; $M_{\text{ср}}$ — составляющая, вызванная сопротивлением газовой или жидкостной среды при вращении подшипника; $M_{\text{тем}}$ — дополнительное увеличение момента трения при повышении температуры.

Различают статический и динамический моменты трения. Статический момент трения представляет собой момент, необходимый для трогания и поддержания медленного (скорость вращения 1–2 об/мин) поворота одного из колец подшипника на некоторый угол при неподвижном втором кольце. Динамический момент трения рассматривается как момент, необходимый для удержания от вращения одного кольца подшипника при вращении второго с заданной скоростью.

На практике получили распространение следующие методы измерения момента трения.

Статический момент трения измеряют при вертикальном и горизонтальном положениях осей подшипника. При вертикальном положении подшипник нагружают колоколом заданной массы и создают крутящий момент струей воз-

духа. Давление воздуха повышают до момента трогания колокола, в тот же момент производят отсчет давления, пропорционального моменту трения.

При горизонтальном положении оси измеряют момент трения пары подшипников, которые устанавливают в опоры и нагружают сбалансированным барабаном. Через барабан перекидывают нить, на концах которой закреплены грузы, разность масс которых создает крутящий момент, равный максимальному заданному статическому моменту трения. Если момент трения пары подшипников превышает момент, создаваемый грузами, барабан остается неподвижным.

Динамический момент трения измеряют методами выбега и компенсации. При использовании метода выбега подшипник устанавливают с вертикальной осью вращения, нагружают заданным весом и разгоняют нужное кольцо до определенной скорости. Затем разгон прекращают и измеряют время и количество оборотов кольца до его полной остановки. По этим значениям вычисляют момент трения.

При использовании метода компенсации подшипник устанавливают с горизонтальной осью вращения и вращают внутреннее кольцо с помощью электродвигателя. Наружное кольцо при этом увлекается с моментом, равным моменту трения. Этот момент компенсируют внешней нагрузкой, которая и подлежит измерению.

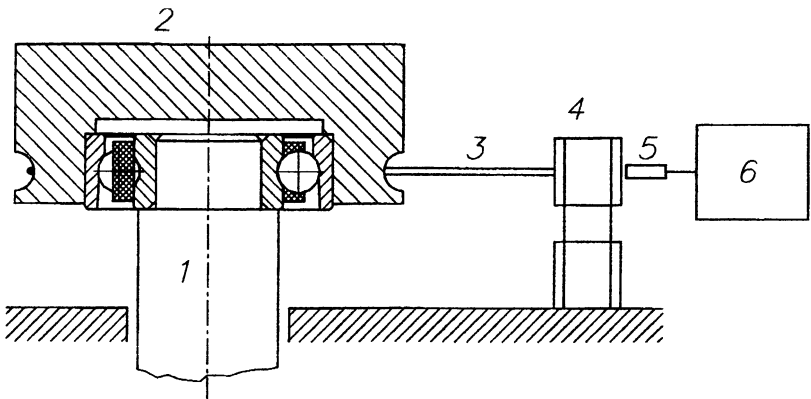


Рис.1. Схема устройства для измерения момента трения

В цеховых условиях при проведении сборочных работ для измерения момента трения в подшипниках используются все описанные методы. Одна-

ко, приборы, построенные в соответствии с ними сложны в использовании и громоздки. Во многих случаях для получения окончательного результата требуются вычисления.

Авторами разработано малогабаритное устройство, максимально простое и удобное для использования в сборочных цехах. Устройство, схема которого показана на рис. 1, работает по методу компенсации. В нем производится измерение момента, которым при вращении внутреннего кольца увлекается наружное.

Подшипник устанавливается на выходной вал шпинделя 1, который приводится во вращение электродвигателем. На наружное кольцо подшипника устанавливается оправка 2, соединенная тросиком 3 с силоизмерительным устройством, состоящим из упругого элемента (плоскопружинного параллелограмма 4) и бесконтактного индуктивного датчика 5. Так как момент трения равен произведению измеряемого усилия на радиус оправки 2, то отсчетное устройство прибора 6 типа БИМП-2 проградуировано в единицах измерения момента. Нагрузка на подшипник создается весом оправки 2.

Разработанное устройство использовалось при исследовании различных способов снижения момента сопротивления вращению радиально-упорных шарикоподшипников. Результаты исследований были опубликованы ранее.

Литература

1. А.И.Спришевский. Подшипники качения. М.: Машиностроение, 1969.

УДК 621.391:532.783

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРООПТИКИ МИКРООБЪЕМОВ МОДУЛИРУЮЩИХ ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СТРУКТУР

Развин Ю.В., Потачиц В.А.*, Лавровский Л.А.*
Белорусский национальный технический университет
**Институт электроники НАН Беларуси*
Минск, Беларусь

Для современных систем оптической обработки информации актуальны задачи создания перестраиваемых оптических элементов. Практическая реализация таких устройств особенно важна при формировании когерентных световых полей с заданным распределением интенсивности. Новые возможности создания таких функциональных элементов открываются при раз-

работке пространственных жидкокристаллических модуляторов, выполненных на основе квазирегулярных ЖК-микрообъемов. Одним из решений данной задачи являются структуры на основе жидких кристаллов, капсулированных в полимерной матрице. Однако такие среды обладают не только неоднородным пространственным распределением микрообъемов ЖК, но и характеризуются значительной неоднородностью свойств этих микрообъемов.



Рис. 1.

В работе рассматриваются особенности ориентации жидкокристаллических молекул и формирования ЖК-микрообъемов в регулярных структурообразующих матрицах. В качестве таких структурообразующих матриц используются волоконно-оптические подложки и микроструктурированные пленки анодного оксида алюминия. На рис. 1 приведены микрофотографии применяемых структур. Волоконно-оптическая подложка состоит из набора волокон диаметром до 4 мкм. Как показали выполненные на электронном растровом микроскопе структурные исследования, волоконно-оптические подложки имеют сложную гексагональную структуру поверхности с характерной неравномерностью, величина которой может достигать 0.05 мкм и более. Сформированные на такой поверхности прозрачные электроды и ориентирующие слои сохраняют неоднородный микромозаичный рельеф. Микроструктурированные пленки анодного оксида алюминия содержат регулярные микроканалы (нижняя микрофотография). В работе использовались пленки АА толщиной 80...100 мкм с диаметром микроканалов 5...20 мкм. Исследуемые образцы представляют собой планарную электрооптическую сэндвич-структуру, ограниченную оптическими подложками (с нанесенными на них проводящими и ориентирующими слоями), между которыми находится модулирующий слой. Наиболее интересные результаты получены для структур на основе волоконно-оптических подложек, работающих в режиме планарного переключения.

Исследование режима планарного переключения представляет интерес, прежде всего, с развитием технологии TFT ЖК-микродисплеев. При данном режиме переключения в ЖК-слое возникают искажения ориентации, приводящие к изменению пространственных характеристик жидкокристаллических структур. Исходная ориентация слоев нематических ЖК (с диэлектри-

ческой анизотропией $\Delta\epsilon \sim 1 \dots 1,5$) гомеотропная. Исследуемые образцы характеризовались следующим геометрическими параметрами: ширина электродов — $10 \dots 50$ мкм, длина электродов — $10 \dots 20$ мм, ширина межэлектродного промежутка — $15 \dots 100$ мкм, толщина слоя ЖК — $5 \dots 10$ мкм. В таком модуляторе условно можно выделить в начальном искажении ориентации ЖК-молекул регулярную (связанную с топологией электродов) и структурную (определяемую микроструктурой поверхности ВОП) составляющие.

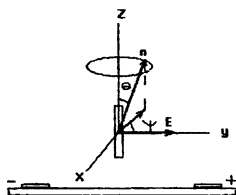


Рис. 2.

На рис.2 показана ориентация ЖК-молекул светового микроклапана, работающего в режиме планарного переключения. В исходной гомеотропной ориентации молекул ЖК на краях волокон, выступающих над поверхностью межэлектродного промежутка, возникает, так называемая, коническая деформация, для которой характерен наклон молекул относительно оси OZ. При подаче на электроды управляющего электрического напряжения в приэлектродных областях микрообъема ЖК возникают (из-за различного по знаку угла преднаклона молекул ЖК) два домена. Граничная область между этими доменами представляет собой стенку. Для пристеночных молекул жидкого кристалла за счет одновременной переориентации в разных направлениях создается диэлектрически стабильная ситуация (несмотря на то, что $E \perp n$ и $\Delta\epsilon > 0$). Коническая деформация при наличии анизотропии электропроводности приведет к образованию электрического поля вдоль оси OX. Представим искажения директора ЖК в пристеночной области следующим образом:

$$n_x = \sin\theta \sin\psi(x); \quad n_y = \sin\theta \cos\psi(x); \quad n_z = \cos\theta$$

Распределение молекул ЖК в этой области можно оценить, исходя из одноконстантного приближения уравнения Франка для свободной энергии микрообъема ЖК

$$F = \int (K/2)[(\operatorname{div} n)^2 + (\operatorname{rot} n)^2 - (n \cdot E)^2 \Delta\epsilon / 4\pi K] dx,$$

где K-индекс Франка

Для малых углов ψ получаем:

$$d^2\psi/dx^2 + k^2\psi = 0$$

где $k^2 = E_x^2 \Delta\epsilon / 4\pi K$

Общее решение этого дифференциального уравнения можно представить в виде:

$$\psi = \psi_0 \text{Sin}kx$$

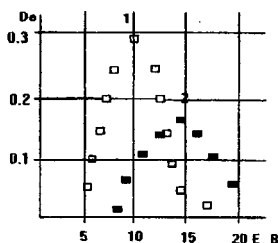


Рис.3.

Таким образом, начальная коническая неустойчивость в ориентации молекул ЖК приводит к развитию синусоидальных деформаций вдоль оси ОХ. Если при $U = 5$ В наблюдается образование стенки, то при напряжениях свыше 7В происходит ее синусоидальная квазипериодическая деформация. При напряжении ~ 15 В синусоидальная деформация распространяется на всю межэлектродную область и преобразуется в систему 180° -стенок. При этом дифракционная решетка, состоящая из стенок одного направления, превращается в двухмерную. На рис.3 представлены зависимости дифракционной эффективности для 1-го и 2-го порядков дифракции зондирующего излучения на формируемой структуре от величины управляющего поля. Как видно, при помощи такой структуры можно получить перестраиваемую дифракционную решетку и осуществлять эффективную перекачку излучения между порядками дифракции.

Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект Ф01-312).

УДК 389.001

РАЗРАБОТКА ПРИНЦИПА ХРАНЕНИЯ И ПЕРЕДАЧИ РАЗМЕРА ЕДИНИЦЫ КОНЦЕНТРАЦИИ ЭЛЕКТРОННЫМИ ЭКВИВАЛЕНТАМИ РАБОЧИХ ЭТАЛОНОВ

**Воробей Р.И., Гусев О.К., Киреенко В.П., Тявловский А.К.,
Тявловский К.Л., Яржембицкий В.Б.**
*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

Для поверки и калибровки средств измерений концентрации растворов электролитов используются рабочие эталоны концентрации — поверочные растворы, т. е. смеси веществ с известными (установленными или приписанными) значениями содержания компонентов смеси и характеристиками их погрешности. Большой интерес представляет анализ возможности замены поверочных растворов их электронными моделями (эквивалентами), поскольку такая замена открывает широкие возможности для автоматизации метрологических работ и снижения их себестоимости.

Как следует из литературных данных [1], зависимость удельной электрической проводимости (χ) раствора s от его концентрации при неизменных внешних условиях имеет нелинейный характер и может быть описана некоторой однозначной функцией сохраняющей монотонность в пределах диапазона измерений.

$$\chi = f(c) \Big|_{x_1, x_2, \dots, x_n = \text{const}}, \quad (1)$$

где x_1, x_2, \dots, x_n — параметры внешних условий

Поскольку концентрация s поверочного раствора, в соответствии с требованиями методики поверки, может принимать только ограниченное число дискретных значений, то функция $f(c)$ легко может быть протабулирована. Представление функции преобразования $f(c)$ в виде дискретной последовательности позволяет реализовать ее в виде компьютерной модели [2]; таким образом, эквивалент поверочного раствора может быть выполнен в виде цифровой электронной схемы. Определим электрические параметры этой схемы.

Модуль импеданса поверочного раствора между электродами кондуктометрической ячейки $\left| \dot{Z} \right|$ определяется УЭП раствора χ и постоянной ячейки k :

$$\left| \dot{Z} \right| = \frac{k}{\chi}, \quad (2)$$

Функция преобразования системы «поверочный раствор — датчик концентрации» с учетом (1) и (2) может быть записана следующим образом:

$$i = \frac{u}{|Z|} = \frac{1}{k} \cdot f(c) \cdot u, \quad (3)$$

где u — выходное напряжение измерительного генератора; i — ток кондуктометрической ячейки.

Поскольку преобразователи кондуктометрических концентратометров нечувствительны к сдвигу фазы сигнала на выходе кондуктометрической ячейки относительно фазы сигнала измерительного генератора (сдвиг фазы не является информационным параметром), то модуль импеданса может быть представлен эквивалентным активным сопротивлением R :

$$R = |Z|, \quad (4)$$

Диапазон УЭП используемых поверочных растворов для диапазона изменения концентрации от 0 до 3,0 %, составляет порядка $10^{-6} \dots 10^{-1}$ См/см. Постоянная ячейки в этом случае, как правило, принимается равной $k = 0,2$ см⁻¹. Следовательно, минимальное значение эквивалентного активного сопротивления раствора составляет порядка (3, 4)

$$R_{\min} = \frac{0,2 \text{ см}^{-1}}{0,1 \text{ См/см}} = 2 \text{ Ом}, \quad (5)$$

Переходное сопротивление $R_{\text{неп}}$ сухих контактов при подключении к электродам датчика электронного устройства — эквивалента поверочного раствора по порядку величины соответствует R_{\min} и включается последовательно с ним. Следовательно, таким устройством не может быть прецизионный резистор, поскольку в этом случае функция преобразования датчика концентрации примет вид

$$i = \frac{u}{R + R_{\text{неп}}} = \frac{1}{k + R_{\text{неп}} \cdot f(c)} \cdot f(c) \cdot u, \quad (6)$$

что не соответствует требуемой зависимости (3). Случайный характер распределения величины $R_{\text{неп}}$ исключает возможность внесения в результат поправки на величину $R_{\text{неп}} \cdot f(c)$.

Эквивалентом поверочного раствора может служить преобразователь напряжение-ток, коэффициент преобразования S которого, в соответствии с (3), равен

$$S = \frac{1}{k} \cdot f(c) \neq f(R_{\text{неп}}), \quad (7)$$

Условие (7) может быть выполнено, если входное сопротивление электронного эквивалента $R_{\text{вх}}^2$ удовлетворяет условию

$$R_{\text{ex}}^2 \gg R_{\text{вых}}^{CI} + R_{\text{пер}}, \quad (8)$$

где $R_{\text{вых}}^{CI}$ — выходное сопротивление генератора измерительного напряжения концентромера;

$$R_{\text{вых}}^2 \gg R_{\text{ex}}^{CI} + R_{\text{пер}}, \quad (9)$$

где $R_{\text{вых}}^2$ — внутреннее сопротивление источника тока на выходе электронного эквивалента; R_{ex}^{CI} — входное сопротивление измерительной цепи преобразователя концентромера.

Функция преобразования $u \rightarrow i$ эквивалента должна быть линейной, причем коэффициент преобразования $f(c)$ в формуле (3) должен задаваться табличным способом. Таблица значений $f(c)$ должна выбираться в зависимости от температуры измеряемого раствора. Полное математическое описание поверочного раствора, таким образом, имеет вид

$$i = \frac{1}{k} \cdot f(c, T) \cdot u, \quad (10)$$

где $f(c, T)$ — табличная функция.

С учетом изложенных соображений, модель эквивалента поверочного раствора может быть реализована в виде структурной схемы, которая включает 3 основных узла (рис. 1):

- 1 — буферный усилитель;
- 2 — программируемый преобразователь напряжения, коэффициент преобразования которого задается в табличном цифровом виде;
- 3 — преобразователь напряжение — ток.

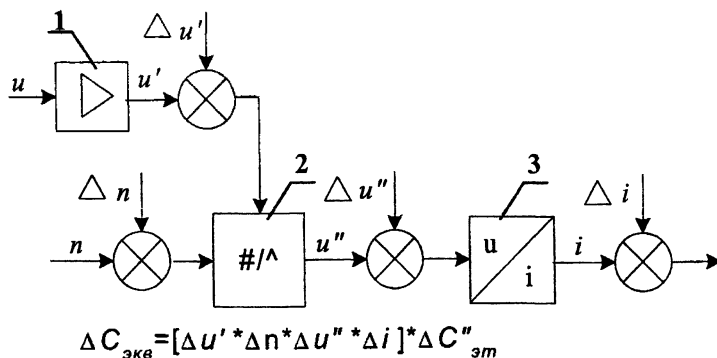


Рис. 1. Модель электронного эквивалента рабочего эталона концентрации

Буферный усилитель 1, обладающий высоким входным сопротивлением (порядка 100 МОм), служит для согласования уровня выходного напряжения генератора концентратомера и диапазона входных напряжений преобразователя 2, и для сведения к пренебрежимо малой величине методической погрешности, связанной с ненулевыми значениями внутреннего сопротивления генератора концентратомера и переходного сопротивления электрод — контакт эквивалента. Преобразователь 2 непосредственно выполняет функцию преобразования мгновенных значений напряжения генератора в значения выходного сигнала в соответствии с уравнением (10). Преобразователь 3 напряжение-ток служит для преобразования выходного сигнала блока 2 в требуемую физическую величину — силу тока и согласования выходного сопротивления эквивалента с ненулевым входным сопротивлением концентратомера.

Выводы

Математическая модель поверочного раствора и его электронного эквивалента включает в себя преобразование измерительного напряжения в ток кондуктометрической ячейки при бесконечном входном электрическом сопротивлении преобразователя и идеальном источнике тока на его выходе. Коэффициент преобразования задается табличной функцией, в качестве входных параметров которой выступают концентрация поверочного раствора и его температура. Данная модель может быть реализована в виде структурной электрической схемы, основными узлами которой являются буферный усилитель, программируемый преобразователь напряжения и преобразователь напряжение-ток.

Литература

1. Алексеев В. И. Количественный анализ. Под ред. д-ра хим. наук П. К. Агасяна. Издание 4-е, перераб. М.: Химия, 1972. — 504 с., ил.
2. Джиладдари И.З., Сидорик В.В. Физика в компьютерных моделях. Минск, Пион, 1998, 248 с.

УДК 389.001

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБЪЕКТА В ПРОЦЕДУРЕ ИЗМЕРЕНИЙ КОНЦЕНТРАЦИИ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА

Гусев О.К.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

Определение значения концентрации носителей заряда в объектах различной природы представляет собой важную измерительную задачу, решение которой в реальных условиях измерений способствует повышению качества изделий и технологических процессов.

Концентрация носителей заряда является параметром физической модели объекта измерений [1,2], выбор которой определяются требованием ее адекватности — необходимостью максимального соответствия цели измерений.

Базовой моделью явления электрической проводимости, отражающей принцип, на котором основаны традиционные методы измерений концентрации носителей заряда в однородных объектах, является выражение:

$$J = KU \sum_i N_i \mu_i, \quad (1)$$

где J -ток через электроды K - постоянная, учитывающая геометрическую конфигурацию объекта, электродов и электрического поля, U - разность потенциалов между электродами, N_i и μ_i — концентрация и подвижность i -ой компоненты носителей заряда.

Следует отметить два типа объектов:

1. Полупроводники с примесной проводимостью, для которых $i=1$ (электронная, либо дырочная проводимость)

$$J = KUN\mu, \quad (2)$$

Величины N и μ не имеют однозначной функциональной связи между собой вследствие большого разнообразия механизмов рассеяния носителей заряда в твердом теле, поэтому косвенные измерения согласно (2) позволяют определять только произведение $N\mu$, а их отдельное определение требует дополнительного независимого измерения. Для этого используют явление возникновения гальваномагнитной ЭДС в объекте при воздействии на него магнитного поля с индукцией B , перпендикулярной направлению тока J :

$$U_H = K_U UB\mu, \quad (3)$$

где K_U и K_J — постоянные, учитывающие геометрическую конфигурацию объекта, электродов и электрического поля. На рассмотренном принципе ос-

нованы измерения концентрации и подвижности носителей заряда методом эффекта Холла.

Растворы сильных кислот и щелочей, для которых $i=2$ (проводимость за счет анионов и катионов)

$$J = KU(N^+ \mu^+ + N^- \mu^-) = KUN(\mu^+ + \mu^-), \quad (5)$$

где $N^+ = N^- = N$ — концентрации ионов, а μ^+ , μ^- — их подвижности.

Доминирующим механизмом рассеяния носителей заряда в растворах электролитов является кулоновское взаимодействие ионов, поэтому величины N и $(\mu^+ + \mu^-)$ — функционально связаны между собой, и для их отдельного определения достаточно косвенных измерений согласно (4). Рассмотренный принцип положен в основу методов и средств измерения удельной проводимости (кондуктометры) и концентрации (концентратомеры или солемеры) растворов электролитов.

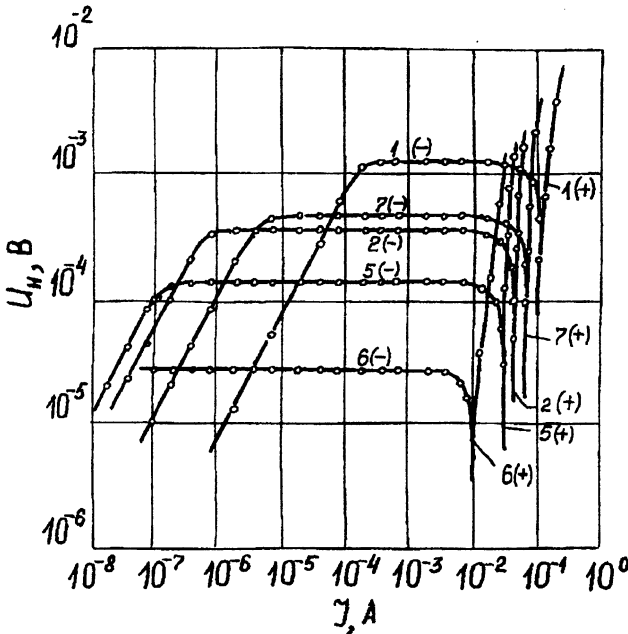


Рис. 1. Зависимость ЭДС Холла в кристаллах $p\text{-InAs}$ от величины электрического тока при различных обработках поверхности

Несоответствие реальных объектов обоих типов рассмотренным моделям возникает при постановке ряда измерительных задач как при научных исследованиях, так и при технологическом контроле производственных про-

цессов, что проявляется в методических погрешностях измерений, которые могут превышать допусковые значения, а в ряде случаев равноценны грубым ошибкам. Типичными ситуациями являются нарушение требования качественной и количественной однородности полупроводниковых кристаллов в моделях (2–3), а также отсутствие априорной информации о типе измеряемого раствора электролита и функциональной связи величин N и $(\mu^+ \mu^-)$ в выражении (4).

А Измерение концентрации носителей заряда в узкозонных полупроводниковых соединениях с инверсионными каналами на поверхности

На рис. 1 показаны экспериментальные зависимости ЭДС Холла в кристаллах $p\text{-InAs}$ при температуре 77 К [3]. Согласно разработанной модели в области малых (до 10^{-4} – 10^{-3} А) электрических токов проводимость осуществляется по поверхности образца, при этом измеряемые экспериментально величины ЭДС Холла и проводимости позволяют рассчитывать поверхностную плотность и подвижность электронов в инверсионных каналах. После достижения величины тока J_s , которому соответствует падение напряжения вдоль инверсионного канала U_b , равное пороговому напряжению пробоя поверхностного p - n -перехода, происходит стабилизация поверхностной составляющей электрического тока, приводящая к появлению протяженной (2–3 порядка величины тока) полки на зависимости ЭДС Холла от тока.

В процессе возрастания электрического тока происходит расширение области пробоя поверхностного p - n -перехода и при достижении величины $J_0 = Y_b \Delta x / R_d (1 - \Delta x)$, в нее попадают холловские контакты кристалла. При этом нарушается условие выключения объемной составляющей ЭДС Холла и происходит инверсия знака измеряемой ЭДС с аномального (отрицательного) на положительный. Дальнейшее увеличение тока приводит к асимптотическому приближению значений ЭДС Холла к ее объемному значению.

Как видно из приведенных данных, процедура измерения параметров как объема, так и поверхности кристаллов должна включать анализ полной зависимости ЭДС Холла от тока, на основе которого строится модель объекта измерений (наличие или отсутствие инверсионных каналов) и выбираются режимы, при которых измерительный сигнал (2)–(3) содержит информацию о параметрах конкретной области кристалла (концентрации дырок в объеме или плотности электронов в поверхностном инверсионном канале).

Б. Измерение концентрации растворов кислот и щелочей в технологических трубопроводах.

Измерения концентрации чередующихся дозированных объемов кислот и щелочей в длинных технологических трубопроводах сопровождается отсутствием априорной информации о типе измеряемого раствора электроли-

та в заданном сечении трубопровода. В этой ситуации повышение точности измерений потребовало разработки принципов и методов получения такой информации, совместимых с техникой кондуктометрических измерений.

В работе [4] нами разработаны принцип и метод определения типа раствора, основанные на явлении разделения токов динамической поляризации контактной кондуктометрической ячейки, согласно следующей модели:

$$\frac{k}{N \cdot (\lambda^\circ - (B_1 \cdot \lambda^\circ + B_2) \cdot \sqrt{N}) \cdot (1 + \alpha'(T_2 - T_1))} \cdot \frac{dJ}{dt} + \left(\frac{4\pi \cdot (d_a + d_x)}{\varepsilon \cdot S} - \frac{k_1 N^{k_2} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_{adc}}}\right) \cdot S}{\varphi_a - \psi_1} \right) \cdot i(t) = \frac{dU}{dt}, \quad (5)$$

где i — ток кондуктометрической ячейки; t — время; k, S — константы определяемые геометрическими размерами кондуктометрической ячейки; λ° — эквивалентная электрическая проводимость при бесконечном разбавлении; B_1 и B_2 — константы, зависящие от вида ионов; T_1 и T_2 — базовое и текущее значения температуры; λ' — коэффициент температурной зависимости; d_a и d_x — толщина сольватной оболочки анионов и катионов; ε — диэлектрическая проницаемость; φ_a — абсолютный скачок потенциала между электродом и раствором; ψ_1 — скачок потенциала в диффузной части двойного электрического слоя; k_1, k_2 — коэффициенты адсорбции; τ_{adc} — постоянная времени адсорбции.

Согласно модели (5), характеристики двойного электрического слоя на границе раздела чувствительный элемент-электролит определяются составом и структурой поверхности чувствительных элементов, типом присутствующих в растворе ионов, процессами специфической адсорбции на поверхности чувствительных элементов и практически не зависят от концентрации. Таким образом, включение в процедуру измерений концентрации растворов кислот и щелочей измерительного преобразования и анализа потенциодинамических кривых вида (5) позволяет моделировать тип раствора в заданном сечении и обеспечивать требуемую точность измерений концентрации растворов электролитов согласно (4).

Выводы

Проведенный в работе анализ методов измерений концентрации носителей заряда в объектах с неадекватными моделями показывает перспективность для обеспечения требуемой точности измерений в заданных условиях использовать моделирование объекта измерений на основе информации, полученной в рамках операций измерительной процедуры.

Литература

1. МИ 1317-96. Результаты и характеристики погрешности измерений.. Москва, Издательство стандартов, 1986., 29 с.
2. Джилавдари И.З., Сидорик В.В. Физика в компьютерных моделях. Минск, Пион, 1998, 248 с.
3. Андерсен Г.Ю., Гусев О.К., Киреенко В.П., Зайтов Ф.А., Яржембицкий В.Б. Влияние условий измерений на аномальный эффект Холла в p-InAs. Физика и техника полупроводников. Т.25, вып.11, 1991, с.1999-2002.
4. Воробей Р.И., Гусев О.К., Киреенко В.П., Тявловский А.К., Тявловский К.Л., Яржембицкий В.Б. Определение типа и концентрации растворов электролитов на основе анализа потенциодинамических кривых. Вести БНТУ, 2003, №2, с.

УДК 621.383

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЖК-МОДУЛЯТОРА В СХЕМЕ ОПТРОННОЙ СТРУКТУРЫ

Малаховская В.Э., Развин И.Ю.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

В настоящее время в информационно-измерительных системах широко используются оптронные структуры с открытым (управляемым) оптическим каналом [1]. Эффективность работы таких систем, содержащих элементы на основе жидкокристаллических структур, определяется пропускной способностью и быстродействием ЖК-элементов. В данной работе приведены результаты построения и анализа физической модели оптронной структуры диодного типа с управляемым оптическим каналом (УОК), в которой в качестве модулирующих элементов применяются отдельные электрооптические жидкокристаллические (ЖК) слои. В качестве излучающих и фоточувствительных элементов используются соответственно светодиоды и фотодиоды.

1. В рамках выбранной нами физической модели (геометрическое приближение) проведем качественную оценку светопередачи в такой оптронной структуре. Принцип действия рассматриваемой схемы основан на двойном преобразовании сигнала. Входной электрический сигнал, характеризующийся параметрами $U_{вх}$ и $I_{вх}$, преобразуется источником излучения (ИИ) в световой поток Φ_1 . Световой поток Φ_1 передается по оптическому каналу (ОК)

к фотоприемнику (ФП), который осуществляет обратное преобразование светового сигнала в электрический (Увых, Jвых).

Определяющим параметром такой схемы, характеризующим ее передаточные свойства, является коэффициент передачи тока [1]:

$$K = \frac{J_{\text{вых}}}{J_{\text{вх}}}, \quad (1)$$

Для выбранной модели с учетом геометрических параметров (размеры рабочих поверхностей светодиода (d_{cd}), фотодиода ($d_{\phi n}$) и расстояние между ними l) и коэффициента преломления оптической среды n_{oc} коэффициент светопередачи оптического канала определяется следующим выражением:

$$\theta_{\text{б}} = \theta_r + \theta_{\text{н}}, \quad (2)$$

где $\theta_{\text{н}} = f(n_{\text{н}})$ и $\theta_r = f(d_{\text{нб}}/d_{\text{тн}}, l)$ — параметры, определяемые характеристиками оптической среды и геометрией канала.

Тогда коэффициент передачи K можно записать:

$$K = \eta_{cd} \eta_{\phi n} \theta_{oc} \quad (3)$$

где $\eta_{\phi n}$ — квантовый выход фотоприёмника, η_{cd} — внешний квантовый выход светодиода.

Проанализируем полученное выражение (3). Во-первых, можно считать, что каждый фотон, достигнувший фотоприёмника, генерирует носитель фототока (это хорошо выполняется для ряда фотодиодов). Тогда полагаем $\eta_{\phi n} \approx 1$. Во-вторых, коэффициент светопередачи оптического канала θ_{oc} имеет две составляющие. В общем случае $\theta_r < 1$. Но при малых значениях l и $d_{\phi n}/d_{cd} > 3$ (эти условия соответствуют эксперименту) значение $\theta_r \rightarrow 1$. Коэффициент θ_{oc} определяет выигрыш в светопередачи ОК со средой с n_{oc} по сравнению со случаем воздушного промежутка между СД и ФП. В диапазоне значений n_{oc} : $1 < n_{oc} < 2$, величина $\theta_{oc} \rightarrow n_{oc}^2$. Учитывая сделанные приближения, соотношение (5) можно представить в виде

$$K_{\text{max}} \approx \eta_{\text{нб}} n_{\text{н}}^2 (1 + 1/n_{oc}^2), \quad (4)$$

2. Управление параметрами оптического канала в нашем случае осуществляется составным ЖК-модулятором, в котором имеется два отдельных ЖК-слоя, расположенных последовательно по ходу светового луча. Данные ЖК-слои работают в противофазном режиме. При подаче на электроды модулятора управляющего напряжения происходит изменение угла ориентации ЖК-молекул φ (направление директора ЖК), т.е. $\varphi = f(U)$, возникает переориентация ЖК-слоя в электрическом поле. С этим процессом связано изменение оптических характеристик ЖК-слоя: коэффициента преломления n и оптической анизотропии $\Delta n = n_e - n_o$ [2]. Расчет зависимостей n и Δn от величины управляющего напряжения U дает следующие решения:

$$n(U) = n_0 n_e \{ [n_0 \sin \varphi(U)] I + [n_0 \cos \varphi(U)]^2 \}^{-1/2}, \quad (5)$$

$$\Delta n(U) = n_0 \{ [\sin \varphi(U) + (n_0^2/n_e) \cos \varphi(U)]^{-1/2} - 1 \}, \quad (6)$$

Световой поток при прохождении через ЖК-слой приобретает разность фаз:

$$\delta = (2\pi/\lambda) * \int (n_e - n_0) dz = (2\pi/\lambda) * \int \Delta n(U) dz, \quad (7)$$

Таким образом, световой поток Φ^* , прошедший через модулятор, будет равен:

$$\Phi_0 (\sin I 2V) I \sin I (d_1/2) \sin I (d_2/2), \quad (8)$$

С учетом модуляционных характеристик ЖК-слоев коэффициент передачи исследуемой структуры описывается следующим выражением:

$$K = \eta_{\text{ср}} n_{\text{ср}} I (\sin^2 \beta)^2 (1 + 1/n_{\text{ср}}^2) [\cos(\delta_1/2 - \delta_2/2) - \cos(\delta_2/2 + \delta/2)]^2$$

При выборе оптического материала для УОК необходимо учитывать следующие требования. Во-первых, изменение оптических параметров материала должно происходить при малых величинах управляющих сигналов. Во-вторых, необходимо, чтобы коэффициент корреляции спектральных характеристик излучателя, фотоприемника и УОК был близок к единице, а управляемая оптическая среда сохраняла заданные условия светопередачи в оптронной структуре.

3. В выполненных экспериментах использовались нематические ЖК. Исследования проводились на экспериментальных ЖК-ячейках «сэндвич»-геометрии, изготовление которых осуществлялось по обычной методике [2]. Толщина ЖК-слоев составляла 5–50 мкм. Начальная ориентация этих слоев формировалась методом натирания рабочих поверхностей подложек. В качестве электродов использовались прозрачные тонкие пленки ИТО. На базе этих ячеек изготовлялся ЖК-модулятор. Для формирования импульсов управления, подаваемых на электроды модулятора, применялись стандартные источники постоянного и переменного напряжения (Б5-47, Г5-54, Г3-18).

Характерной особенностью исследуемой структуры является бистабильный режим и существенное сокращение импульсов переключения. Временные характеристики зависят как от параметров ЖК-материала, так и от взаимной ориентации ЖК-слоев относительно друг друга. Получено расширение частотной полосы переключения исследуемой структуры до 5 кГц. Экспериментально установлена зависимость бистабильного режима переключения от частоты импульсов управления.

Литература

1. Носов Ю.Р. Оптоэлектроника. —М: Радио и связь, 1989. —280 с.
2. Блинов Л.М. Электро- и магнитооптика жидких кристаллов. —М: Наука, 1978. -384 с.; Индикаторные устройства на жидких кристаллах. Под ред. Готры З.Ю. —М: Сов. Радио, 1980. —240 с.

УДК 621.9.048.4

**ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ
НА ФОРМИРОВАНИЕ АЛМАЗОНОСНОГО СЛОЯ
НА БОКОВЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ РАСПИЛОВОЧНЫХ ДИСКОВ
СПОСОБОМ ИХ ШАРЖИРОВАНИЯ**

Киселев М.Г., Минченя В.Т., Касьяненко И.А., Скарулис С.Д.
Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

Важнейшим этапом в технологии изготовления распиловочных дисков, предназначенных для распиливания кристаллов алмаза [1] является формирование на их боковых поверхностях алмазоносного (режущего) слоя. Это достигается путем закрепления на них тем или иным способом зерен алмазных микропорошков. На сегодня в алмазообработке с этой целью применяется в основном способ механического шаржирования зерен алмазных микропорошков путем их стирания в поверхность диска плоской шайбой или накатным роликом. Однако при традиционном шаржировании не обеспечиваются условия гарантированного внедрения и надежного закрепления алмазных частиц в поверхностном слое диска, чем объясняется невысокая режущая способность и весьма низкая износостойкость такого инструмента.

Как показали предшествующие исследования [2] наиболее полно отмеченные условия могут быть реализованы за счет применения в процессе шаржирования ультразвуковых колебаний, действующих нормально обрабатываемой поверхности. При этом необходимо использовать разомкнутую акустическую колебательную систему, в которой деформирующий элемент (инструмент) жестко не связан с выходным торцом ультразвукового преобразователя. При ультразвуковом возбуждении такой системы в ней может устанавливаться виброударный режим взаимодействия ее звеньев, который в сочетании с вращательным движением деформирующего элемента реализует наиболее благоприятные для шаржирования условия виброударного втирания зерен алмазных микропорошков в поверхность диска. Более того, благодаря такому режиму, процесс ультразвукового шаржирования протекает при весьма малых значениях сил трения, возникающих в зоне обработки. Это обстоятельство позволяет реализовать схему двустороннего шаржирования распиловочных дисков, что в условиях традиционной обработки из-за их весьма малой жесткости, сделать невозможно.

На специально созданной установке по двустороннему шаржированию распиловочных дисков с ультразвуком была проведена серия экспериментов,

в ходе которых варьировались следующие параметры: статическая нагрузка $P_{ст}$ от 10 до 50 Н; амплитуда ультразвуковых колебаний A_0 от 2 до 6 мкм (при резонансной частоте 21,6 кГц); частота вращения преобразователей $n_{пр}$ от 100 до 300 об/мин; частота вращения заготовки распиловочного диска n_d от 2,5 до 40 об/мин; продолжительность шаржирования $t_{обр}$ от 30 с до 3 мин. Шаржированию подвергались распиловочные диски толщиной 0,05, 0,06 и 0,07 мм; использовался алмазный микропорошок АСМ 20/14 и касторовое масло в отношении 1:3. После обработки диски отжигались и испытывались на режущую способность полученного алмазоносного слоя, которая оценивалась по величине износа твердосплавного (ВК6) индентора диаметром 3 мм за фиксированное время его контактирования с вращающейся боковой поверхностью диска при постоянной статической нагрузке равной 2Н.

Принципиальная особенность процесса шаржирования с ультразвуком состоит в том, что процесс внедрения и закрепления алмазных частиц в материале диска (подложки) осуществляется за счет виброударного воздействия на них рабочей поверхности деформирующего элемента. Это, как известно, [3] значительно облегчает условия протекания пластических деформаций, что обеспечивает более глубоко в сравнении с традиционным шаржированием, внедрение алмазных частиц, а, соответственно, большую степень их закрепления в подложке. Поэтому сформированный на боковых сторонах распиловочного диска алмазоносный слой по режущей способности и износостойкости существенно превосходит аналогичные показатели у дисков, шаржированных по традиционной технологии.

Вторая особенность шаржирования с ультразвуком заключается в том, что в виброударном режиме работы акустической колебательной системы, деформирующий элемент совершает сложное колебательное движение вдоль оси преобразователя, т.е. перпендикулярно обрабатываемой поверхности. Важно подчеркнуть, что оно совершается с определенной цикличностью, а каждый цикл включает в себя три характерных стадии взаимодействия элементов. Так с момента ее ультразвукового возбуждения деформирующий элемент воздействует на алмазные зерна с амплитудой и частотой вводимых ультразвуковых колебаний. Затем по истечении некоторого времени (времени накачки) за счет явления динамического увода подвижного звена системы (корпуса преобразователя) реализуется эффект «затягивания» виброударной системы по амплитуде. На этой стадии происходит постепенное возрастание амплитуды колебаний деформирующего элемента при снижении частоты его взаимодействия с поверхностью диска (режим кратного соударения). При достижении критической величины динамического увода, происходит срыв системы с виброударного режима, затем вновь наступает стадия ее возбуждения «затягивание» на виброударный режим и т.д.

Таким образом, процесс шаржирования с ультразвуком представляет собой совокупность повторяющихся переходных процессов «затягивания» системы на виброударный режим и «срыва» с него. При этом наличие низкочастотных колебаний значительной амплитуды создает благоприятные условия для гарантированного попадания алмазных частиц в зону обработки, а их динамическое виброитерирование в материал подложки осуществляется, главным образом, за счет высокочастотной (ультразвуковой) области спектра колебаний во время стадий возбуждения и «затягивания» системы на виброударный режим, что, как указывалось выше, создает благоприятные условия для формирования алмазоносного слоя с высокими эксплуатационными показателями.

Литература

1. Епифанов В.И., Песина А.Я., Зыков Л.В. Технология обработки алмазов в бриллианты. – М.: Высшая школа, 1982. – 335 с.
 2. Киселев М.Г., Минченя В.Т., Касьяненко И.А. Повышение эксплуатационных показателей распиловочных дисков// Порошковая металлургия. Минск. 1998. Вып.21. – С. 23-26.
- Марков А.И. Ультразвуковая обработка материалов. – М.:Машиностроение,1980. – С.237.

УДК 621.9.048.4

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ИНТЕНСИФИЦИРУЮЩЕГО ВОЗДЕЙСТВИЯ УЛЬТРАЗВУКА НА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ПРОЦЕССА МЕХАНИЧЕСКОГО РАСПИЛИВАНИЯ КРИСТАЛЛОВ АЛМАЗА

Киселев М.Г., Минченя В.Т., Галенюк Г.А., Дроздов А.В.
Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

Цель данной работы заключалась в экспериментальной оценке степени влияния виброударного режима взаимодействия распиловочного диска с обрабатываемой заготовкой на интенсивность распиливания хрупких материалов и определения метода реализации данного режима. Как аналог, применительно к которому прогнозируется использовать полученные результаты, рассматривается процесс механического распиливания кристаллов алмаза. [1,2] Распиливание

кристаллов алмаза выполняется на многосекционном распиловочном станке модели ШП-2. Поэтому, с учетом применяемого оборудования и оснастки была создана экспериментальная установка на базе станка модели ШП-2, позволяющая моделировать процесс распиливания кристаллов хрупких материалов, в том числе и монокристаллов алмаза, как в обычных условиях, так и с реализацией виброударного режима работы акустической системы экспериментальной установки. Это достигается применением ультразвуковых колебаний, подаваемых на акустическую систему установки и создания виброударного режима взаимодействия распиловочного диска с обрабатываемой заготовкой.

Принципиальная схема установки показана на рис. 1.

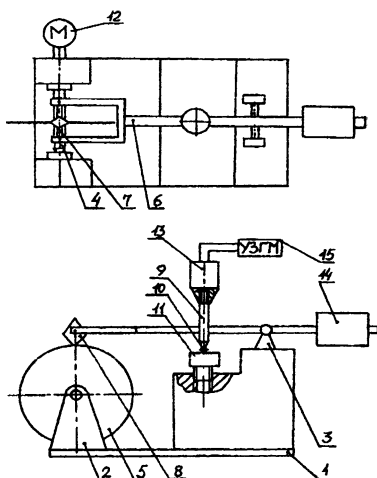


Рис. 1. Установка для распиливания кристаллов алмаза

Установка для распиливания кристаллов алмаза содержит станину 1, на которой установлены две пары стоек: передняя 2 и задняя 3. В передней паре стоек 2 в бронзографитовых подшипниках скольжения вращается шпindelь 4 с распиловочным диском 5. Задняя пара стоек 3 станины 1 распиловочной секции служит для установки стрелы 6 с оправками 7, в которых закрепляется обрабатываемая заготовка 8. Для ориентации обрабатываемой заготовки 8 относительно распиловочного диска 5 к концу одной из оправок с помощью резьбового крепления прикреплялся фланец, в котором был выполнен квадратный паз с размером стороны равным 6мм.

Стрела 6 жестко связана со стержнем-концентратором 9 с помощью двух зажимных винтов. Стержень-концентратор 9 имеет полуволновую длину и конический наконечник для усиления амплитуды колебаний.

Стержень-концентратор 9 через промежуточный элемент 10 опирается на регулировочную платформу 11, на которой выполнена резьба с мелким шагом. На торце конического наконечника выполнена сферическая поверхность с которой сопрягается подвижный промежуточный элемент 10 в виде стального шарика.

Изменение угла наклона стрелы и подача заготовки на распиловочный диск а также ее отвод происходит при повороте регулировочной платформы 11 вокруг своей оси и перемещении ее с помощью резьбового соединения относительно станины распиловочной секции. Обрабатываемая заготовка 8, клеивается в квадратный паз на фланце оправки 7, и поджимается второй оправкой закрепленной в шарнирном устройстве стрелы 6. Вращение шпинделя 4 осуществляется с помощью плоскоременной передачи (на рисунке не показана) от синхронного электродвигателя 12. Ультразвуковой преобразователь 13 установлен над стержнем-концентратором 9, и контактирует с ним с помощью резьбового соединения. Для уравнивания стрелы 6 и создания рабочего давления на обрабатываемой заготовке 8 установлен регулируемый противовес 14. Для возбуждения виброударного режима работы в зоне распиливания была использована ультразвуковая аппаратура, включающая генератор 15 ультразвуковых колебаний УЗГМ, выходной мощностью до 40 Вт с частотой в пределах 22...44 кГц и пьезоэлектрический преобразователь с номинальной частотой 44 кГц.

Особенностью данной установки является разомкнутая акустическая система с опорным винтом, предназначенным для передачи ультразвуковых колебаний на связанную с ним распиловочную стрелу и имеющим полуволновую длину и конусообразный наконечник для усиления амплитуды колебаний. Кроме того, данная система включает подвижный промежуточный элемент, масса которого может быть различна. При ультразвуковом возбуждении такой системы между шариком и выходным торцом концентратора реализуется виброударный режим взаимодействия, представляющий собой совокупность переходных процессов «затягивания» системы на виброударный режим и срыва с него. В результате обрабатываемая заготовка, закрепленная на стреле, совершает как ультразвуковые колебания на стадии «затягивания» системы на виброударный режим, так и низкочастотные колебания на стадии «срыва» с этого режима. Таким образом, относительно просто реализуется режим виброударного механического распиливания кристаллов алмаза, при котором возможно перевести ультразвуковые колебания преобразователя ра-

бочей установки в широкий спектр колебаний, включающий и низкочастотные колебания распиловочной стрелы, на которой закреплен кристалл сверхтвердого хрупкого материала, что позволяет увеличить производительность и значительно улучшить качество поверхности распиленной заготовки.

Установка работает следующим образом. Включается электродвигатель 12 установки. При помощи регулировочной платформы 11 стрела 6 с закрепленным кристаллом 8 опускается на режущий инструмент 5. Включается ультразвуковой преобразователь 13, от которого колебания передаются через стрелу 6 на кристалл 8. По мере углубления режущего инструмента 5 в кристалл 8, механизмом изменения угла наклона стрелы 6 опускают регулировочную платформу 11 и, меняя параметры ультразвукового воздействия, добиваются максимального качества поверхности на начальном и конечном этапах распиловки и значительного повышения производительности в промежутке между этими этапами.

В качестве обрабатываемого материала в исследованиях использовалось кварцевое стекло, из которого изготавливались образцы в виде кубиков с размером ребра 5 мм. По аналогии с распиливанием кристаллов алмаза, образцы наклеивались на оправку, имеющую специальный паз для ориентации заготовки на «ребро».

Для распиливания использовался стальной алмазный отрезной диск толщиной 0,5 мм с размером алмазного микропорошка 28/14. В ходе экспериментов каждый образец распиливался как в обычных условиях обработки, так и при ультразвуковом воздействии.

В ходе выполнения экспериментов варьировались следующие технологические параметры: статическая нагрузка $P_{ст}$ принимала следующие значения: 0,45; 0,91; 1,20 Н; скорость резания $V = 9,5$ м/с; и частота ультразвуковых колебаний 44 кГц.

С целью количественной оценки степени влияния ультразвуковых колебаний на интенсивность (производительность) распиливания образцов использовался коэффициент эффективности

$$\eta_b = \left(1 - \frac{h_{ст}}{h_{ак}} \right) * 100\%, \quad (1)$$

где $h_{ст}$ и $h_{ак}$ — соответственно глубина распила в обычных условиях и при ультразвуковом воздействии за одинаковое время обработки.

С практической точки зрения важно оценить интенсифицирующее влияние ультразвука на всю операцию распиливания, т.е. на повышение производительности обработки. В табл.1 приведены данные отражающие значения интенсивности распиливания образцов (мм²/с) при различных режимах обработки. В этой серии экспериментов окружная скорость диска была постоянной и составляла 9,5 м/с.

Таблица 1.

Данные о производительности процесса распиливания как в обычных условиях так и при реализации виброударного режима работы акустической системы

Нагрузка, Н	Производительность, мм ² /мин	
	с УЗК	без УЗК
1,20	5,92	2,72
0,91	3,94	1,47
0,45	4,33	1,27

Из их анализа видно, что в исследованном диапазоне изменения статической нагрузки, скорости резания и амплитуды колебаний реализация виброударного режима взаимодействия распиловочного диска с обрабатываемой заготовкой повышает по сравнению с традиционным распиливанием производительность выполнения операции. При этом доминирующим фактором, определяющим это повышение, является значение статической нагрузки на обрабатываемый кристалл. Из таблицы 1 видно, что наибольшее значение производительности как в обычных условиях обработки, так и при реализации виброударного режима взаимодействия распиловочного диска с обрабатываемой заготовкой достигается при наибольшем значении статической нагрузки. Однако чтобы оценить интенсифицирующее влияние виброударного режима работы на производительность необходимо оценить зависимость коэффициента эффективности от статической нагрузки.

Данные, отражающие это повышение, выраженное в процентах по отношению к распиливанию в обычных условиях, приведены в табл. 2.

Таблица 2.

Повышение интенсивности распиливания (%) за счет реализации виброударного режима работы акустической системы при значениях статической нагрузки

Нагрузка, Н	h, %
0,91	63
0,45	71

Таким образом, исходя из данных приведенных на таблицы 2 можно сделать вывод что наибольшее значение коэффициента эффективности достигается при наименьшем значении статической нагрузки $P_{ст}=0,45$ Н. Это мож-

но объяснить тем, что данная нагрузка позволяет снизить давление, создаваемое регулируемым противовесом, опорного винта на промежуточный элемент установки, что позволяет повысить амплитуду вынужденных колебаний при эффекте «затягивания» промежуточного подвижного элемента в виброударный режим работы. Однако при дальнейшем уменьшении $R_{ст}$ при подаче ультразвуковых колебаний с преобразователя на опорный винт происходил отрыв заготовки от режущего инструмента и прекращение дальнейшего распиливания. Таким образом, из приведенных выше данных экспериментов можно сделать вывод, что доминирующим фактором, влияющим на производительность процесса распиливания хрупких материалов является значение статической нагрузки $R_{ст}$. Однако при обычном режиме распиливания значение этого фактора ограничивается устойчивостью режущего инструмента. При реализации же виброударного режима работы акустической системы описанной выше экспериментальной установки происходит прерывистое резание со взаимным ударным взаимодействием обрабатываемой заготовки и торцевой поверхности распиловочного диска. Воспринимая в дополнение к обычной статической нагрузке ударные, обрабатываемая заготовка из кварцевого стекла разрушается интенсивней, чем при обычном распиливании. Причем интенсивность ударных нагрузок на обрабатываемую заготовку будет прямо пропорционально зависеть от статической нагрузки, создаваемой регулируемым противовесом экспериментальной установки, что наглядно отражают данные таблицы 1, а также от амплитуды вибрационных колебаний. Необходимо заметить, что при реализации виброударного режима взаимодействия ультразвукового преобразователя с промежуточным элементом колебания преобразователя представляет собой сложение нескольких типов колебаний из которых можно выделить два основных: высокочастотные с частотой 44 кГц и амплитудой колебаний порядка 2–3 мкм, и низкочастотные (60–200 Гц) с более значительной амплитудой порядка 50–100 мкм.

Следовательно, можно сделать вывод о том, что доминирующую роль в повышении производительности и качества процесса механического распиливания хрупких материалов играет низкочастотная составляющая в спектре возникающих широкодиапазонных колебаний. Отсюда вытекает важный с практической точки зрения вывод о том, что в качестве источника вынужденных колебаний, сообщаемых обрабатываемой заготовке, помимо ультразвука можно использовать вибраторы сравнительно невысокой частоты (60–200 Гц), но обеспечивающие достаточную амплитуду генерируемых колебаний (0,05–0,2 мм). В частности это могут быть инерционные, электромагнитные, электродинамические и другие типы вибраторов, которые характеризуются простотой конструкции, надежностью в работе, а также более низкой сто-

имостью, в сравнении с ультразвуковыми колебательными системами. Кроме того, применение низкочастотных вибраторов позволяет достаточно просто обеспечить резонансные условия виброударного режима распиливания, когда частота колебаний, создаваемых виброприводом, будет равна или кратна частоте собственных колебаний в упругой системе обрабатываемая заготовка – распиловочный диск. В свою очередь, реализация резонансного режима виброударного распиливания позволяет применять виброприводы малой мощности, а, соответственно, небольших габаритов и массы, что упрощает конструкцию распиловочной головки.

Литература

Епифанов В.И., Песина А.Я., Зыков Л.В. Технология обработки алмазов в бриллианты.–М.: Высшая школа, 1982. –335 с.

Бочаров А.М., Климович А.Ф., Старовойтов А.С., Снежков В.В. Изнашивание монокристаллов алмаза.–МН.: Беларуская навука, 1996.–144 с.

УДК 553.8

СТАНОК ДЛЯ ОБРАБОТКИ КАБОШОНОВ ИЗ ПОДЕЛОЧНЫХ КАМНЕЙ ДЛЯ ЮВЕЛИРНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Луговой В.П., Гаврилов А.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

К ювелирным изделиям массового спроса относятся украшения с вставками из поделочных и самоцветных камней. Вставки могут иметь различные формы с ограненными боковыми сторонами или со сферической и овальной формы, именуемые кабошонами. Такие изделия из камня используются в качестве вставок в кольцах, браслетах, серьгах, ожерельях и других ювелирных изделиях. В связи с большим количеством типоразмеров применяемых кабошонов возникает потребность разработки и использования специального технологического оборудования для их производства. Основными требованиями к подобному оборудованию является быстрая переналаживаемость для обработки различных типоразмеров изделий, простота обслуживания и эксплуатации.

Кинематика формообразования кабошонов состоит из комбинации четырех простых движений: главного движения- вращения шлифовального круга, круговой подачи обрабатываемой заготовки вокруг своей оси, кача-

тельного движения заготовки относительно центра сферы и поперечной подачи инструмента или заготовки, совершаемое за период одного качательного движение заготовки.

Обработка кабашонов осуществляется с применением специальных державок — китгов, выполненных в виде цилиндрических стержней с перпендикулярной площадкой для закрепления обрабатываемой заготовки кабашона. При этом форма площадки должна соответствовать форме обрабатываемого изделия-кабашона в плане, но с меньшими размерами для предотвращения соприкосновения с шлифовальным кругом.

При обработке кабашонов овальной формы станок оснащают также копиром-эталоном, который обеспечивает получение требуемой формы изделия с заданными размерами полуосей овальной площадки высоты кабашона. Таким образом, при синхронном вращении и качании копира-эталоны и заготовки обеспечиваются размеры по трем координатным осям полусферической формы кабашона.

Для реализации вышеописанной кинематики формообразования существуют различные технические решения. Наибольшее применение среди них нашли кабашонные станки ЛПО «Русские самоцветы». Станок обеспечивает синхронное вращение двух шпинделей для установки заготовки и копира через редуктор и червячную передачу. Шлифование заготовки осуществляется периферийной рабочей поверхностью инструмента. Для равномерного износа шлифовального инструмента по ширине обеспечивается его возвратно-поступательным движением от кривошипно-шатунного механизма. Переключение направления подачи на станке осуществляется автоматически. К недостаткам данного станка следует отнести систему воспроизведения контура заготовки. При обработке периферией шлифовального круга снижается точность воспроизведения контура эталона из-за несовпадения радиусов кривизны упора копира и инструмента, результатом чего является искажение овальной формы кабашона в сторону увеличения размера одной из полуосей.

Другие известные кабашонные станки имеют некоторые конструктивные особенности приводов синхронного вращения шпинделей, опор скольжения, направляющих механизмов подачи.

Предлагаемая конструкция станка имеет ряд изменений с целью устранения указанных недостатков. Основная отличительная особенность станка заключается в возможности обработки изделия торцевой рабочей поверхностью абразивного круга, которая исключает образование погрешности воспроизведения обрабатываемого профиля детали. Это достигается тем, что упорная поверхность копира принимается плоской и подобной торцевой поверхности инструмента. Кроме того, в отличие от приведенного ранее ана-

лога, предлагаемая конструкция станка обеспечивает продольную подачу шпиндельной головки и силовой прижим инструмента к обрабатываемой детали. Привод станка претерпел конструктивные изменения. Вместо используемых ранее приводов — редукторов, сложных в изготовлении и сборке, а также неудобных в эксплуатации, в новой конструкции использован малогабаритный мотор-редуктор с повышенным крутящим моментом и зубчато-ременная передача. Таким образом обеспечивается синхронное вращение обоих шпинделей для установки и зажима эталона и обрабатываемой заготовки. Кинематика формообразования овального контура заготовки обеспечивается на новом станке в результате сложения следующих простых движений: возвратно-поступательного движения инструмента вдоль оси, вращения заготовки вокруг продольной оси и качательного движения заготовки вокруг точки опоры. Это позволило упростить конструкцию станка и отказаться от многосвязного и сложного в исполнении привода ручного качания шпиндельной бабки. С целью механизации процесса обработки деталей на станке также предусмотрен электромеханический привод возвратно-качательного движения шпиндельной бабки с копиром и заготовкой, приводимого в движение от второго мотор-редуктора и кривошипно-шатунного механизма.

Произведенные изменения конструкции также позволили изменить схему подачи СОЖ в зону резания, обеспечить защиту шпиндельного узла от попадания шлама и воды в подшипниковый узел и, тем самым, повысить надежность и долговечность конструкции станка.

Предложенная конструкция позволяет осуществить многостаночное обслуживание, повысить производительность и точность обработки деталей, упростить обслуживание. Станок имеет малые габариты и вес, малую потребляемую мощность и может быть использован в условиях как серийного, так и единичного производства в условиях малых ювелирных мастерских.

УДК 621.9.048.4

НАСТОЛЬНЫЙ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ СТАНОК ДЛЯ ОБРАБОТКИ ПОЛУДРАГОЦЕННЫХ КАМНЕЙ И СВЕРХТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ

Киселев М.Г., Луговой В.П., Коленда Е.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

Использование ультразвуковых колебаний при абразивной обработке является одним из методов интенсификации процесса резания материалов, повышения точности обработки и качества поверхности изделий. Возбуждение ультразвуковых колебаний на поверхности дискового инструмента позволяет получить различные типы волн, обеспечивая возможность управления процессом обработки изделий, направленных на достижение требуемых показателей. Новизна данной работы заключается в реализации метода ультразвуковой обработки в области ювелирного производства, а также при обработке сверхтвердых материалов в других областях техники.

В основе разработанной конструкции станка положена новая конструкция акустической системы, состоящая из ультразвукового преобразователя с волноводом и присоединенного к нему абразивного инструмента на металлической связке. Диск-притир диаметром 185 мм соосно закреплялся на выходном торце конического концентратора в пучности продольной ультразвуковой волны. Резонансная частота колебаний составили, 16,5 и 21,5 кГц. На поверхности диска возбуждалась осесимметричная изгибная волна с распределением переменной амплитуды вертикальных смещений по его радиусу. Проведенные эксперименты показали возможность получения различных форм и распределения амплитуды колебаний. Наиболее оптимальной оказалась конструкция диска толщиной 8 мм и менее, в котором нижняя поверхность торца имеет плавный радиус сопряжения с торцем ультразвукового волновода.

На базе разработанной акустической системы был изготовлен опытный образец ультразвукового настольного станка для обработки полудрагоценных камней.

Акустическая система размещалась в шпиндельном узле на опорах качения, позволяющая передать электрические сигналы от ультразвукового генератора через щеточный токосъемник.

Конструкция станка и ультразвукового инструмента имеет максимальное приближение к традиционно применяемым станкам и инструментам для

повышения эффективности их использования, с технологических возможностей и универсальности.

Он состоит из сварного корпуса, облицованного листовой сталью, на котором установлена опорная плита и прикрепленный к ней шпиндельный узел, роль которого выполняет установленная в подшипниках качения акустическая система. Привод станка состоит из электродвигателя постоянного тока с возможностью ступенчатого переключения скоростей и ременной передачи. Привод станка позволяет получить четыре ступени скорости от 900 до 3000 об/мин и позволяет работать в режиме применения ультразвука и в обычном режиме без воздействия ультразвука на инструмент. На стальной плите предусмотрена возможность установки верхнего столика слева или справа от шпинделя с целью применения различных конструкций ограничных приспособлений.

В качестве инструмента возможно применение алмазного инструмента на металлической связке, позволяющего возбудить в нем ультразвуковые колебания, а также шаржируемый инструмент, изготовленный из стали или медных сплавов. Были использованы различные инструменты с различной зернистостью синтетического алмаза, в т.ч. 80/63; 28/20, 14/10 и 10/7 с целью исследования технологии обработки самоцветных камней.

Станок имеет следующие технические характеристики: — мощность привода главного движения — 0,25 кВт; мощность ультразвукового генератора — не более 200Вт; вес станка — не более 35 кг; габаритные размеры 600х400х350 мм; амплитуда ультразвуковых колебаний на торце диска притира — 3–6 мкм.

Станок оснащен системой питания и отвода СОЖ, в качестве которой используется проточная вода.

Предварительные испытания станка производились с использованием образцов камней с различной твердостью: корунда, яшмы, лазурита, оникса и мрамора. Результаты испытаний показали возможность повышения производительности обработки в 2 раза при одновременном улучшении качества поверхности, снижения шероховатости обработанной поверхности.

УДК 621.9.048.4

УСТАНОВКА ДЛЯ ШАРЖИРОВАНИЯ РАСПИЛОВОЧНЫХ ДИСКОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИЗГИБНЫХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ

Киселев М.Г., Минченя В.Т., Скарулис С.Д., Касьяненко И.А.
Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

В технологии изготовления режущего инструмента (распиловочных дисков) для распиливания кристаллов алмаза важнейшим этапом, определяющим эксплуатационные показатели инструментов, является формирование алмазоносного слоя на их боковых поверхностях.

На сегодня применяются два принципиально отличных способа формирования такого слоя:

- механическое шаржирование в поверхность диска зерен алмазных микропорошков путем их втирания плоской шайбой или вдавливания накатным роликом;
- гальваническое наращивание, как правило никелем, алмазных зерен на боковых поверхностях распиловочного диска.

Анализ существующих способов показал, что они не обеспечивают требуемый уровень эксплуатационных показателей распиловочных дисков. При традиционном шаржировании не достигаются условия гарантированного внедрения и надежного закрепления алмазных частиц в поверхностном слое диска, чем объясняется невысокая режущая способность и низкая износостойкость такого инструмента. У режущих инструментов с алмазно-гальваническим покрытием эти показатели существенно выше, но, при прочих равных условиях их толщина значительно выше, чем у шаржированных инструментов, что обуславливает возрастание потерь при распиливании кристалла алмаза. Поэтому в настоящее время проводятся работы по совершенствованию процесса механического шаржирования боковых поверхностей распиловочных дисков, как наиболее перспективного.

На кафедре «Конструирование и производство приборов» БНТУ разработан способ формирования алмазоносного слоя на боковых поверхностях распиловочных дисков, путем шаржирования с применением энергии ультразвука и установка, реализующая предложенный способ /1/. Установка содержит узел шаржирования, состоящий из двух вращающихся в одном направлении с одинаковой скоростью ультразвуковых преобразователей с концентраторами, установленных на направляющих качения с возможностью

осевого перемещения. На торцах концентраторов ультразвуковых колебаний закреплены, с возможностью самоустановки их рабочих поверхностей, деформирующие инструменты, выполненные в виде спиленных шариков из стали ШХ15.

Для создания виброударного режима работы деформирующего элемента при шаржировании, применяется акустическая система с продольными ультразвуковыми колебаниями. Недостатком предложенной схемы шаржирования являются большие габаритные размеры, сложность поддержания резонансного режима в акустической системе с продольными ультразвуковыми колебаниями, необходимость принудительного вращения деформирующих инструментов и ультразвуковых преобразователей, что сопровождается неизбежными биениями, высоким уровнем вибрации в системе станок-приспособление-инструмент-деталь, что в совокупности не позволяет реализовать высокую частоту вращения деформирующих инструментов и в результате снижает качество шаржирования. Такая схема шаржирования не обеспечивает стабильность выходных параметров акустической системы из-за переходных процессов в токосъемных узлах при вращении преобразователей.

С целью повышения стабильности виброударного режима работы акустической системы, повышения эффективности шаржирования и износостойкости шаржированной поверхности распиловочных дисков, нами разработана установка для формирования алмазоносного слоя на боковых поверхностях дисков с использованием изгибных ультразвуковых колебаний.

Схема устройства для шаржирования распиловочных дисков

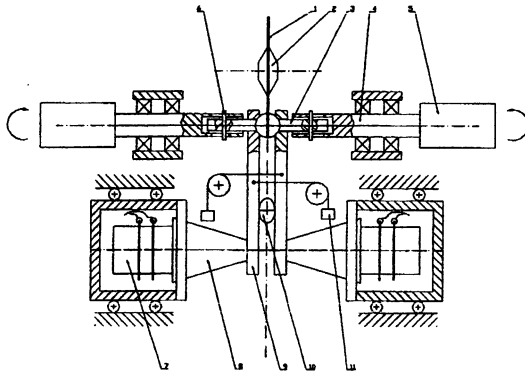


Рис. 1. Установка для шаржирования распиловочных дисков

Установка для шаржирования (рис.1) содержит распиловочный диск 1, который закрепляется на вращающемся шпинделе 2, деформирующие инструменты 3, выполненные в виде полусфер с хвостовиками, связанные с вала-

ми 4 приводов 5 посредством пальцевых муфт 6. Ультразвуковые преобразователи 7 с концентраторами 8 установлены на направляющих качения. На торцах концентраторов жестко закреплены волноводы изгибных колебаний 9, связанные с кулачком 10 и грузами 11.

Установка работает следующим образом. Обрабатываемый распиловочный диск 1 с нанесенной на его поверхность алмазной пастой приводится во вращение посредством шпинделя 2. Внедрение алмазных зерен в материал диска 1 осуществляется посредством деформирующих инструментов 3, которые вращаются и совершают низкочастотные колебания при помощи валов 4, связанных с приводами 5 посредством муфт 6. Деформирующим инструментам 3 сообщаются изгибные ультразвуковые колебания от ультразвуковых преобразователей 7 с концентраторами 8, на которых жестко закреплены волноводы ультразвуковых колебаний 9. Прижим деформирующих инструментов 3 к поверхности диска 1 осуществляется с помощью кулачка 10 и грузов 11.

Под действием низкочастотных и ультразвуковых колебаний, действующих в момент замыкания всех звеньев акустической системы, деформирующие инструменты 3, в результате затягивания системы на виброударный режим, совершают сложные колебательные движения. Низкочастотная часть спектра обеспечивает гарантированное попадание абразивных частиц в зону обработки за счет увеличения амплитуды колебаний, а их последующее внедрение в материал диска осуществляется за счет ультразвуковой части спектра. Возбуждение изгибных колебаний позволяет стабилизировать работу акустической системы, а также исключить влияние технологических режимов на резонансные свойства системы. Применение изгибных ультразвуковых колебаний позволяют увеличить амплитуду в рабочей зоне в 2–3 раза, по сравнению с системами с продольными колебаниями, что повышает эффективность затягивания зерен в зону обработки. Наличие принудительного вращения рабочего деформирующего инструмента в сочетании с колебательным режимом реализует наилучшие условия шаржирования за счет реализации процесса виброударного втирания абразивных частиц.

Литература

1. Авторское свидетельство СССР № 1203790, МКИ В 24 1/04, бюл. № 1 1986 г.
2. М.Г. Киселев, В.Т. Минченя, И.А. Касьяненко повышение эксплуатационных показателей распиловочных дисков.//Порошковая металлургия. Минск: вып. 21 (1998), 23–26.

УДК 534.222

О ВОЗМОЖНОСТИ СОЗДАНИЯ КОМПЛЕКСОВ ДЛЯ МАССОВОГО ОБСЛЕДОВАНИЯ НАСЕЛЕНИЯ ФОНОГРАФИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

Зайцева Е.Г., Гуляева И.В., Кириллов К.Ю., Заикин А.С., Бурак И.Н.
*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

Известные методы диагностики пульмонологических заболеваний достаточно сложны и часто небезопасны для пациента. Аускультация грудной клетки требует высокой квалификации врача, спирография и плетизмография мало приспособлены для массовых обследований. В настоящее время наиболее распространенным способом исследования является рентгенография, недостатки которой достаточно известны. Поэтому в настоящее время проводятся теоретические и экспериментальные исследования с целью создания бронхофонографических приборов с компьютерной обработкой сигнала.

Группой исследователей из научно-исследовательского физико-технического института при ДВГУ (Коренбаум В.И., Кулаков Ю.В., Тагильцев А.А. [1]) исследованы взаимные спектры сигналов, воспринимаемых акселерометром и микрофоном со стетоскопической камерой, размещенными на стенке грудной клетки человека, произносящего слова «Три-три». На основе акустики узких труб и теории излучения бесконечного цилиндра малого сечения получены аналитические выражения, описывающие спектральные характеристики принимаемых сигналов. Показано, что регистрация знаков мнимой части взаимного спектра позволяет разделить воздушные и структурные звуки. Экспериментально зарегистрированы изменения соотношения воздушных и структурных звуков над участками легких при патологии, подтверждаемой анамнезом. В.И.Коренбаумом и др. также предложен метод трахеофонографии (ТФГ), который предусматривает регистрацию и математическую обработку акустического сигнала в ларинготрахеальной области во время форсированного выдоха. Регистрирующий прибор содержит следующие основные узлы: акустический датчик, устанавливаемый на трахее, блок предварительной обработки информации, блок спектрального анализа шума, либо компьютер. Метод ТФГ позволил установить, что у больных с обструктивными нарушениями функции вентиляции легких по сравнению со здоровыми людьми увеличена средняя продолжительность выдоха и время нарастания шума до максимального значения примерно в 2 раза, огибающая шума форсированного выдоха напоминает трапецию, а не колокол, спектр обогащается как в низкочастотной (до 400

Г), так и в высокочастотной (600-1500 Гц) области. Патология верхних дыхательных путей приводит к изменению формы огибающей форсированного выдоха и особенно спектрального состава шума, но параметры трахеофонограмм отличаются от параметров при обструктивных нарушениях. Вышеупомянутыми учеными в [2] предложена методика расчета источников свистов в дыхательных путях на основании фонографических исследований.

Группой украинских исследователей (Вовк И.В., Залуцкий К.Э., Красный Л.Г.[3]) была предложена акустическая модель грудной клетки человека, отражающая основные особенности прохождения дыхательных шумов от трахеи до поверхности тела. Модель учитывает основные особенности анатомического строения тела, экспериментальные данные о физических параметрах биотканей, частотный диапазон, характерный для дыхательных шумов и наличие датчика шумов на поверхности тела. Осуществлена апробация модели путем сравнения вычисленных и измеренных на поверхности грудной клетки характеристик. При этом рассмотрены частотные зависимости колебательной скорости и механического входного импеданса поверхности тела. Разработана математическая модель пьезодатчика, способного регистрировать дыхательные шумы. Определены характеристики поверхностных волн, возникающих вследствие возмущающего воздействия измерительных датчиков на поверхности грудной клетки. Установлено качественное соответствие между расчетными и экспериментально наблюдаемыми характеристиками таких волн. Оценены возможности многоканального измерения характеристик дыхательных шумов.

Из вышеизложенного следует, что метод фонографического исследования пульмонологических заболеваний с использованием регистрации и математической обработки результатов является перспективным, особенно вследствие безопасности для пациентов. Для дальнейшего совершенствования метода необходимо упростить методику измерений и обработку результатов с целью повышения производительности и оперативности диагностики.

Известные методики получения фонографической информации предусматривают процедуру последовательного получения информации в отдельных точках грудной клетки, причем место расположения датчика определяется специалистом. Такой вариант обследования пациентов является длительным и трудоемким. Кроме того, результаты обзора позволяют заключить, что еще не собрано достаточное количество сведений для достаточно точной диагностики пульмонологических заболеваний по результатам автоматизированного фонографического исследования.

Устранить недостаток, связанный с длительностью процедуры записи информации, позволяет применение параллельной записи фонограмм. Та-

кой принцип записи был применен американскими учеными [4] для исследования шумов желудочно-кишечного тракта. Им удалось зарегистрировать гастрономические шумы с помощью собранных в едином корпусе стетоскопа и микрофона. Дальнейшую запись и обработку данных велась с помощью персонального компьютера. Аналогично параллельный принцип можно использовать для фонографии органов дыхания.

С целью адаптации этой методики условиям массового обследования населения предлагается создать стационарное устройство, где процедура записи и анализа информации будет максимально автоматизирована. Устройство представляет собой кабину, куда входит пациент. С использованием следящей системы, например оптопар, регистрируется контур пациента, в соответствии с его размерами автоматически осуществляется параллельный подвод датчиков (микрофонов) в точки, где необходимо производить запись. При этом микрофоны, положение которых не соответствует положению анализируемых точек для пациента с данными размерами, остаются в исходном положении, и информация с них не снимается. После регистрации информации сигнал, снятый с каждого датчика, оперативно обрабатывается следующим образом: рассчитываются его спектры на определенных стадиях дыхания, производится сравнение параметров сигнала и спектра с соответствующими нормами данными. В случае несовпадения параметров с нормальными выдается соответствующая информация, и пациент направляется на дополнительное обследование или лечение. Указанный метод в отличие от рентгенографии безопасен для пациента и более оперативен.

Для реализации указанного способа необходимо решить следующие задачи. Во-первых, выбрать оптимальный способ автоматического поиска исследуемых точек на теле пациента в зависимости от его размеров, например, установить связь между геометрией контура пациента и положением этих точек. Во-вторых, оптимизировать конструкцию датчиков и системы их подачи, чтобы обеспечить требуемое расстояние между исследуемыми точками. В-третьих, выбрать необходимые для качественной передачи важных частотных составляющих сигнала параметры передающей системы. Кроме того, эффективность применения указанной методики главным образом зависит от корреляции между полученным сигналом и результатами традиционной диагностики. Поэтому требуется провести большое количество параллельных экспериментов по обследованию пациентов с использованием предложенной и традиционных методик.

Решение указанных задач требует тесного сотрудничества ученых в технике и медицине.

Литература

1. Коренбаум В.И., Тагильцев А.А., Кулаков Ю.В. Особенности передачи звука голоса человека на стенку грудной клетки. –Акустический журнал, 1998, т. 44, № 3, с.380-390.

2. Коренбаум В.И., Кулаков Ю.В., Тагильцев А.А. Новое в биофизике дыхательных шумов. - Вестник новых медицинских технологий, 1997, т.4, № 1, с.30–36.

3. Вовк И.В., Гринченко В.Т., Олейник В.Н. Проблемы моделирования акустических свойств грудной клетки и измерения шумов дыхания. —Акустический журнал, 1995, Т.41, № 5, с.758–768.

4. Патент США № 6056703. Метод и аппарат для исследования гастрономических шумов./ Р. Сандлер, Х. Мэнси. Заявл. 20.09.96, опубл. 2.05.2000.

УДК 621.762.5

КОРОНАРНЫЕ СТЕНТЫ ИЗ КОРРОЗИОННОСТОЙКОЙ СТАЛИ ДЛЯ ЭНДОВАСКУЛЯРНОЙ ТЕРАПИИ ИШЕМИЧЕСКОЙ БОЛЕЗНИ СЕРДЦА

Александров В.М., Мазюк В.В.,
Адзериho И.Э.*, Мрочек А.Г.*

*Институт порошковой металлургии, БелМАПО**
Минск, Беларусь

Одним из перспективных методов лечения ишемической болезни сердца является коронарное стентирование, заключающееся в проведении стента на баллоне-катетере в пораженный участок коронарной артерии. В зоне стентирования баллон раздувается с помощью шприца или насоса высокого давления, в результате происходит расправление стента и расширение узкого участка артерии. Затем давление в баллоне снимается, катетер извлекается, а расправленный до нужного диаметра стент остается в зоне дилатации.

В институте порошковой металлургии (ИПМ) разработана конструкция и технология изготовления коронарного стента, представляющего спиральную волоконную конструкцию с равномерно распределенными Ω -образными сегментами; пористость стента составляет 85–90%. (рис.1)

Общий вид стента

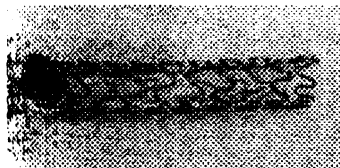


Рис. 1

Микроструктура волокна
стали 316L



Рис. 2

Для изготовления стента использовали волокно коррозионно-стойкой стали марки 316L. Микроструктура волокна представляет собой аустенит с двойным отжигом. Микроструктура волокна (рис. 2) композиционная: волоконистая в центральной части, а ближе к периферии — крупнозернистая (рескристаллизованный аустенит, с произвольно ориентированными зернами).

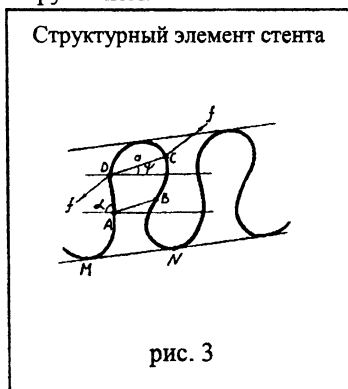
Такой характер структуры обеспечивает одновременно высокие значения предела прочности и пластичности волокна. Высокая прочность обусловлена волокнистым характером структуры центральной части, а пластичность - крупнозернистой матрицей, окружающей центральную часть.

Стент состоит из системы открытых Ω -образных элементов, количество которых в одном уровне (5-7) выбирается в зависимости от исходного диаметра волокна (рис.3). При раскрытии стента, в результате действия растягивающих усилий происходит деформация структурных элементов, которая постепенно переходит от упругой к пластической. Растягивающая сила f определяется из выражения:

$$f = \frac{2c}{Ba \cos \varphi} \arcsin \frac{\sin \Delta \psi}{\sin \alpha},$$

где $c = \mu \rho r^4 / 2$ - крутильная жесткость стержня; ρ - радиус стержня, μ - модуль сдвига.

При $a = 0,34 \cdot 10^{-3}$ м; $B = 2,54 \cdot 10^{-3}$ м; $\alpha = 70^\circ$ и полном развороте структурного элемента (т.е. при $\psi = 0$) внутренние напряжения, вызванные деформацией растяжения в десятки раз выше, чем при кручении. Следовательно, деформацией кручения можно пренебречь. Таким образом, формоизменение структурного элемента стента определяется в основном деформацией изгиба и, в меньшей степени его кручением.



Упруго-пластическая деформация стента определяет такую важную его эксплуатационную характеристику как раскрываемость. Динамика раскрытия стента (раскрываемость) характеризуется величиной давления и временем, необходимым для его полного раскрытия.

Проведенные исследования позволили установить, что процесс деформации стента включает следующие основные этапы:

- зона упругой деформации. Характеризуется тем, что в случае снятия давления в баллоне стент возвращается в исходное состояние;
- зона пластической деформации. Характеризуется тем, что стент увеличивается в размерах на 40-60%. При этом происходит последовательное раскрытие сегментов стента при увеличивающемся давлении;
- резервная зона. Характеризуется фиксированным давлением в системе и отсутствием радиальных деформаций стента;
- зона усталостной деформации завершает процесс раскрытия стента до требуемых значений. На данном этапе стент раскрывается без увеличения давления в системе.

В настоящее время в ИПМ организовано производство по выпуску коронарных стентов, а в БелМАПО проводятся медико-биологические и санитарно-гигиенические испытания.

УДК 615.471

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ ДАТЧИК ДЛЯ ИЗМЕРИТЕЛЕЙ АРТЕРИАЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ

Баранов В.В.¹, Портнов Л.Я.², Холенков В.Ф.¹

*¹Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники*

*²УП «Завод Транзистор»
Минск, Беларусь*

Большое значение в современных электронных медицинских приборах, изготавливаемых на высоком техническом уровне, приобрели датчики, позволяющие преобразовывать измеряемые физиологические параметры в электрические сигналы. Проведение исследований и внедрение новых разработок при создании приборов диагностики заболеваний необходимо для обеспечения контроля за состоянием здоровья населения республики.

Одним из таких приборов является измеритель артериального давления, который может использоваться как лечащими врачами, так и для контроля в домашних условиях. Требования к таким приборам включают относительную простоту обращения с ними пользователя любого уровня технической грамотности, обеспечение точности и быстроты измерения, доступность цен.

Современные электронные приборы для измерения артериального давления включают в свой состав резонансные пьезокерамические датчики [1], полупроводниковые электронные схемы, датчики давления и т.д. Точность показаний прибора и его стабильность во многом зависят от датчика давления, вырабатывающего электрический сигнал, пропорциональный давлению в компрессионной манжете. В приборах могут использоваться полупроводниковые тензорезистивные датчики давления [2]. Основной частью полупроводникового тензорезистивного датчика давления является чувствительный элемент (ЧЭ) (рис. а), представляющий собой кремниевый кристалл с тонкой мембраной (5), полученной травлением площадки в кристалле (3) с одной (коллекторной) стороны, и со сформированной группой диффузионных тензорезисторов (4), соединяемых в виде мостовой схемы с другой (планарной) стороны. ЧЭ служит для преобразования в электрический сигнал измеряемого давления, под действием которого деформируется кремниевая мембрана с тензорезистивным мостом.

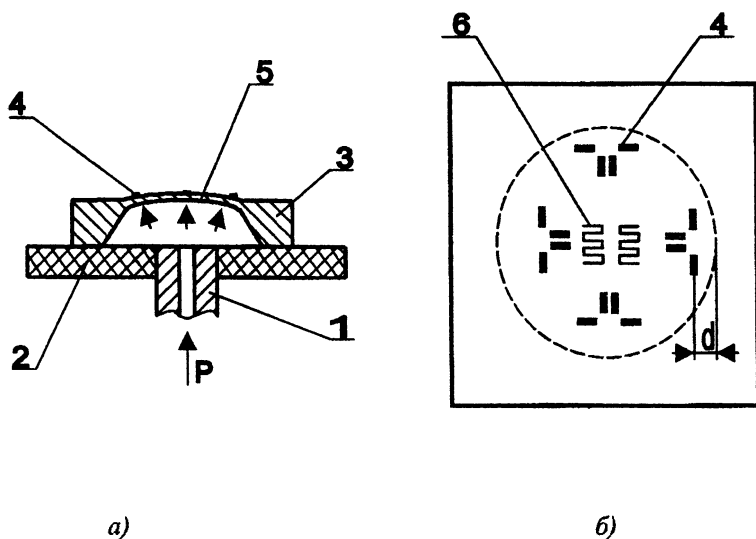


Рис. Схема устройства (а) и типология (б) чувствительного элемента:
 1 – вход для подачи давления; 2 – основание датчика давления;
 3 – чувствительный элемент; 4 – тензорезисторы; 5 – мембрана;
 6 – терморезисторы.

Типовой маршрут изготовления ЧЭ содержит последовательность следующих основных операций:

- двухсторонняя фотолитография для формирования тензорезисторов и микропрофилей в ЧЭ;
- травление пластин для создания мембран ЧЭ;
- формирование тензорезисторов;
- разделение пластин на отдельные кристаллы с ЧЭ;

Контроль толщины мембраны ЧЭ в данной технологии проводится по времени травления и учитывая отклонения толщины кремниевой пластины вдоль диаметра, наличие дефектных областей с повышенной скоростью травления по такой технологии трудно достигнуть воспроизводимости толщины мембран в различных точках пластины. Эти недостатки устранены в разработанной нами технологии [3], где травление мембраны производится после формирования тензорезисторов планарной стороны и разделения пластины на кристаллы. При этом травление и контроль проводится для каждого кристалла ЧЭ отдельно, что позволяет избежать брака и разброса толщин мембран. Конкретно для применяемого процесса разработана специальная оснастка для защиты при травлении планарной стороны ЧЭ и устройство бесконтактного контроля толщины мембраны в процессе травления. Трудоемкость изготовления кристалла в этом случае увеличивается, но исключаются потери за счет сквозного «протравы» кристалла и увеличивается точность получения заданной толщины мембран. На операции двухсторонней фотолитографии за счет погрешностей при совмещении фотошаблонов и разброса толщин пластин создаются условия для отклонения положения тензорезисторов от точек максимальной чувствительности на мембране. Этот недостаток частично устранен за счет использования идентичных групп тензорезистивных мостов, ортогонально расположенных на мембране и смещенных относительно края мембраны на различную величину δ (рис. б). При контроле готовых ЧЭ выбирается тензорезистивный мост, расположенный в зоне с наибольшей деформацией мембраны и соответственно имеющий наибольшую чувствительность. Проведение работ по апробации разработанной технологии позволило значительно увеличить точность изготавливаемых датчиков и исключить брак.

Литература

1. Разработка резонансных пьезокерамических датчиков для съема биометрических данных. В.В.Владимиров, И.Н.Воженин, В.Ф.Конопкин и др. «Электронная промышленность», 1982, N8, с. 8–10
2. Бейлина Р.А., Грозберг Ю.Г., Довгяло Д.А. Микроэлектронные датчики // Новонолоцк, ПГУ – 1002 г., с 70–76

3. Особенности технологии кремниевых мембран датчиков давления. В.В. Баранов, К.Н. Матусевич, В.Ф. Холенков. «Современные проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств». Новополоцк, 2002 г., с. 166–168.

УДК 621.762.5

ПОРИСТЫЙ ДЕНТАЛЬНЫЙ ИМПЛАНТАТ КОРНЕВИДНОЙ ФОРМЫ

Белявин К.Е., Минько Д.В., Чудаков О.П., Федченко И.Ю.

*Институт порошковой металлургии,
Белорусский государственный медицинский университет
Минск, Беларусь*

При осуществлении внутрикостной дентальной имплантации существенные трудности для хирурга представляет атрофия костной ткани альвеолярных отростков челюстей, возникающая в местах дефектов зубного ряда после удаления зубов. Смягчить остроту данной проблемы возможно наиболее ранним применением методики непосредственной дентальной имплантации, то есть вживление имплантата в лунку удаленного зуба. Применявшиеся ранее с подобной целью конструкции имплантатов не учитывали форму и размеры лунок удаленных зубов, в связи с чем приходилось применять большой объем препарирования костной ткани, что в свою очередь иногда отрицательно сказывалось на конечных результатах.

Применение пористых имплантатов способствует решению ряда проблем, стоящих перед клиницистами. Пористая структура дентального имплантата дает возможность прорастания костной ткани внутрь конструкции, что повышает биологическую значимость такого сращивания и носит название остеоинтеграции. Увеличение площади контакта имплантат-кость рассматривается как один из важнейших факторов, влияющих на успех имплантации и обеспечивающий благоприятное распределение нагрузок в опорной кости.

В настоящий момент, по данным многочисленных исследований, лучшим материалом для имплантации принято считать титан. Этот материал является оптимальным с точки зрения биологической и механической совместимости, обеспечивает необходимый ресурс работы изделий в условиях действия знакопеременных нагрузок, имеет сравнительно низкую стоимость. Поведение пористого титана при механическом воздействии наиболее адекватно механическому поведению биологических тканей. При этом комплекс механических

свойств (модуль упругости, усталостная и удельная прочность) пористого титана приближается к комплексу механических свойств костной ткани.

Разработанные в Институте порошковой металлургии совместно с имплантологами Белорусского государственного медицинского университета пористые титановые денальные имплантаты корневидной формы полностью удовлетворяют требованиям создания наибольшей поверхности контакта с костной тканью лунки удаленного зуба при непосредственной имплантации, что позволяет использовать такие имплантаты в качестве более полноценной и функциональной опоры при последующем ортопедическом лечении.

Форма разработанного денального имплантата максимально (на основании предварительно проведенных анатомо-антропометрических измерений) приближена к форме корня естественного зуба, что при непосредственной имплантации является оптимальным и увеличивает вероятность полной остеоинтеграции костной ткани в поровое пространство имплантата.

При разработке конструкции имплантата для достижения лучшей механической совместимости соблюдался принцип нежесткой фиксации, при котором на границе раздела имплантат-кость должен быть переходный слой с пониженным модулем упругости. В этом случае при механическом воздействии в отдельных частях конструкции имплантата могут поддерживаться одинаковые напряжения при разной степени деформации. На практике такой способ передачи нагрузки может быть реализован применением пористого слоя на поверхности раздела имплантат-кость.

Пористый денальный имплантат корневидной формы (рис. 1) состоит из монолитной крепежной части и пористой опорной части. Имплантат имеет сложную сужающуюся к верхушечной части уплощенно-коническую форму, приближающуюся к форме корня зуба.

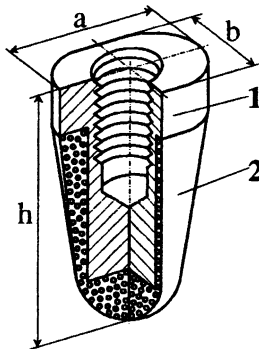


Рис. 1. 1 – крепежная часть; 2 – опорная часть

Таблица 1

Пористый дентальный имплантат корневидной формы

Условное обозначение	a, мм	b, мм	h, мм
ИДК-3,5x5/10	5	3,5	10
ИДК-3,5x5/12			12
ИДК-3,5x5/14			14
ИДК-3,5x6/10	6	3,5	10
ИДК-3,5x6/12			12
ИДК-3,5x6/14			14
ИДК-4x5/10	5	4	10
ИДК-4x5/12			12
ИДК-4x5/14			14
ИДК-4x6/10	6	4	10
ИДК-4x6/12			12
ИДК-4x6/14			14

С учетом анатомических и функциональных особенностей зубочелюстной системы различных групп пациентов разработан типовой ряд (табл. 1), включающий двенадцать типоразмеров дентальных имплантатов, отличающихся друг от друга по длине и диаметру. Применение типового ряда позволило разработать типовой технологический процесс изготовления имплантатов, упростить производство, значительно снизить себестоимость имплантатов и стоимость операции по сравнению с применяемыми за рубежом методиками их индивидуальной подгонки.

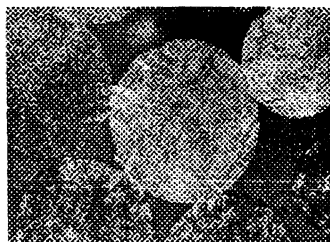


Рис. 2. Микроструктура пористого слоя имплантата. X100

Для производства пористых дентальных имплантатов корневидной формы используется титановый сплав марки ВТ1-0 (ВТ1-00). Пористый слой из порошка этого сплава со сферической формой частиц наносится методами

порошковой металлургии, в частности методом электроимпульсного спекания, что позволяет получать при малых размерах имплантата большую внутреннюю поверхность с открытыми сквозными порами (рис.2) и деформационные характеристики, близкие к характеристикам костной ткани (табл.2)



Рис. 3. Прорастание костной ткани в пористый слой имплантата. X100

Таблица 2

Структурные и физико-механические свойства пористого материала

Материал порошка	Размер частиц, мм	Пористость, %	Средний диаметр пор, мкм	Удельная поверхность $\times 10^{-4}$, $\text{м}^2/\text{г}$	Модуль упругости, МПа	Временное сопротивление при сжатии, МПа	Временное сопротивление при поперечном изгибе, МПа
Титан BT1-0 (BT1-00)	0,3- 0,4	37- 38	127- 148	49-61	1900- 2000	71-73	68-70

Проведенные экспериментальные исследования интеграции имплантата костной тканью показали, что поры по всему объему имплантата плотно инфильтрованы костной тканью. Характер ткани и степень ее адаптации к имплантату в глубине пористой его части исследованы при 100-кратном увеличении (рис.3). Установлена полная инфильтрация исследуемого участка типично костной структурой с полной ее адаптацией к сферическим частицам порошка.

Показателем для биомеханической оценки прочности связи имплантата с костью является удельное давление сдвига или усилие на единицу площади

поверхности имплантата, которое приводит к отрыву имплантата от кости. Этот показатель зависит от отношения силы сдвига имплантата к площади его боковой поверхности. Экспериментальные исследования, проведенные на животных, позволили определить удельное давление сдвига для имплантата с пористой опорной частью, которое составило 22 МПа, что превосходит значения удельного давления сдвига имплантатов с гладкой поверхностью в 3,9 раза, с накатанной — в 1,8 раза, с резбовой — в 1,2 раза.

Исходя из средних значений давления на естественный зуб, возникающих в процессе жевания (около 7 МПа), можно сделать вывод, что разработанный дентальный имплантат из пористого титана должен успешно выдерживать прикладываемые к нему нагрузки, так как по механической прочности он имеет десятикратный запас, а по прочности интеграции в костной ткани — трехкратный запас.

Проведенные приемочные технические, санитарно-гигиенические и медико-биологические испытания показали, что пористый дентальный имплантат корневидной формы обладает высокими прочностными характеристиками, не оказывает общетоксического, раздражающего и аллергенного действия на организм, проявляет высокую биосовместимость с костной тканью.

В составленном по результатам испытаний заключении гистологов отмечен положительный эффект ограниченного препарирования лунки, создающий непосредственный контакт губчатого вещества кости челюсти с пористой опорной частью имплантата. Правильно подобранный типоразмер дентального имплантата улучшает его первоначальную фиксацию в лунке удаленного зуба, что, в свою очередь, сообщает стабильность и позволяет установить имплантат в оптимальном положении для обеспечения правильного протезирования. Форма имплантата позволяет избежать использования костнообразующих материалов и мембран, что снижает стоимость лечения.

На основании проведенных предварительных испытаний установлено, что пористые дентальные имплантаты корневидной формы соответствуют требованиям, предъявляемым к подобным конструкциям. Процесс остеоинтеграции их с челюстной костью проходит без осложнений, что позволяет использовать их в дальнейшем как функционирующую опору для соответствующей ортопедической конструкции.

УДК 621.762

ПОРОШКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ПОКРЫТИЯ В ИЗДЕЛИЯХ МЕДИЦИНСКОЙ ТЕХНИКИ

Ильющенко А.Ф., Савич В.В.

ИПМ НАН Беларуси

Минск, Беларусь

Имплантирование эндопротезов суставов, искусственных корней зуба является безальтернативным методом лечения тяжелых патологий суставов, адентий путем замены, реконструкции или восстановления тканей или органов. Невозможно лечение ряда сердечно-сосудистых заболеваний без искусственных клапанов сердца, эндопротезов сосудов. Эффективным методом лечения травм конечностей и скелета становится остеосинтез – соединение переломов с использованием наkostных (пластины различной анатомической формы и винты) и чрезкостных (аппараты по типу Илизарова) фиксаторов. Во многих видах этих изделий применяются порошковые материалы и покрытия.

Цель настоящей работы – представить оригинальные порошковые материалы, покрытия и технологии, разработанные в ИПМ НАН Беларуси для использования в различных изделиях медицинской техники (ИМТ).

1. Внутрикостные дентальные имплантаты. Служат для фиксации зубных протезов в челюстных костях при частичных или полных дефектах зубного ряда. В течение примерно трех месяцев происходит процесс остеоинтеграции имплантатов [1]. Затем на имплантате устанавливаются крепежные элементы и протез. В ИПМ разработаны конструкции пористых дентальных имплантатов из сферического порошка титанового сплава марки BT1-00 (рис. 1). Типовой ряд дентальных имплантатов включает девять разновидностей цилиндрических пористых имплантатов, конструкция которых обеспечивает прорастание костной ткани в поры и остеоинтеграцию имплантата.

2. Челюстно-лицевые имплантаты. Челюстно-лицевые имплантаты применяют в ортопедической стоматологии, нейрохирургии, детской хирургии для фиксации обломков костей черепа и для замены утраченных фрагментов этих костей. При этом, за счет наличия пористых участков из сферического порошка титана на компактных титановых пластинах (рис. 2), обеспечивается хорошая биосовместимость, высокая коррозионная стойкость, надежная и стабильная вторичная остеоинтеграция и большая несущая способность при возможности подгонки пластины путем изгиба по форме соединяемых костных отломков. Поскольку химический состав используемого титанового сплава пластин, пористых фрагментов и винтов идентичен, то данный вид имплантатов, в отличие от традиционных конструкций, может не извлекаться.

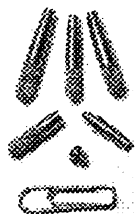


Рис.1. Внутрикостные
денральные имплантаты

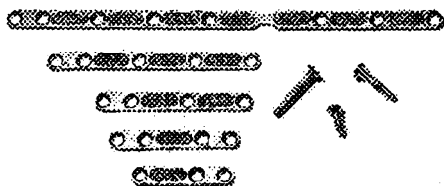


Рис.2. Челюстно-лицевые
композиционные пластины

3. Композиционные титановые пластины для эндопротезирования нижней челюсти. Классические методы восстановительной хирургии нижней челюсти (пересадка свободных невааскуляризованных трансплантатов) у онкологических больных сопровождается большим количеством местных послеоперационных осложнений, что связано с предшествующей лучевой и химиотерапией, и в большинстве случаев приводит к неудаче. В условиях лучевого остеомелита нижней челюсти эти методы практически не применимы. Пересадка аутотрансплантатов с сохраненным или восстановленным питанием для пластики нижней челюсти, с точки зрения мировой медицинской практики, является весьма сложным хирургическим вмешательством, а потому выполняется в единичных клиниках. Эндопротезирование нижней челюсти с использованием имплантатов позволяет существенно снизить травматичность оперативных вмешательств, ускоряет медицинскую и социальную реабилитацию этой сложной категории больных. В ИПМ разработана конструкция и способ получения пластин (рис.3). Они выполнены в виде перфорированной основы, вырезанной из листа титана толщиной 2 мм. Контактные площадки выполнены с пористым покрытием из сферического порошка титана. Применение пористого покрытия позволяет добиться эффективной дополнительной к шурупам фиксации и увеличения опорной поверхности за счет прорастания костной ткани в поры.

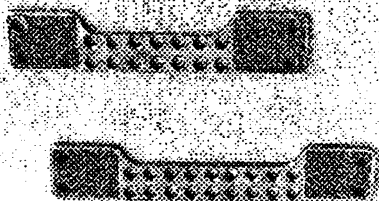


Рис.3. Композиционные пластины для эндопротезирования нижней челюсти

4. Пористые контактные головки эндокардиальных электродов электростимуляции сердца. Современные исследования по эндокардиальной электростимуляции (ЭС) сердца направлены на оптимизацию контактной части электрода и параметров импульса, как факторов наиболее определяющих эффективность ЭС, и, следовательно, экономию энергии кардиостимулятора. Установлено, что между площадью контактной головки и порогом ЭС сердца существует прямая зависимость, так как при уменьшении площади плотность тока увеличивается, а порог стимуляции кардиостимулятора снижается. Таким образом, потребность электроэнергии и исходный порог раздражения миокарда могут быть снижены уменьшением площади наконечника. Помимо величины площади, важное значение придается форме (рельефу стимулирующей поверхности) контактной головки. Считается идеальной форма головки электрода в виде сферы. При ЭС такого наконечника создается сильное и равномерное радиальное электрическое поле, векторы которого обращены в сторону эндокарда. Известно, что поверхностная плотность тока зависит от кривизны стимулирующей поверхности и максимальна в местах наиболее выраженного изгиба поверхности. Поэтому, придав определенную геометрическую форму контакту, можно повысить плотность тока, а значит, усилить эффект ЭС при минимальных энергетических затратах генератора. Пористые электроды имеют следующие преимущества в сравнении с электродами, имеющими монолитную головку: незначительные поляризационные потери; более быстрая и надежная фиксация к эндокарду, биоинертность, малый порог. В ИПМ была разработана контактная головка (рис.4) для эндокардиальных электродов, удовлетворяющая этим требованиям.



Рис.4. Пористая головка эндокардиального электрода

5. Детали эндопротезов суставов. В 1985 г. в ИПМ был разработан и изготовлен экспериментальный образец частичного эндопротеза головки бедра, представлявший собой грибовидное тело (полусфера диаметром 50 мм с цилиндрической ножкой диаметром 10 и длиной 30 мм), на поверхности которого (на ножке и с внутренней стороны полусферы) припечено пористое покрытие из сферических частиц порошка титана, в которое должна была

врастать костная ткань. Конструкция эндопротеза была защищена патентом, однако к тому времени появились более совершенные зарубежные аналоги, представляющие собой тотальные эндопротезы тазобедренного сустава. В связи с изложенным, работы в этом направлении были прерваны до 1995 г., когда в рамках хозяйственного договора с ЗАО «Алтимед», были разработаны конструкции и технология изготовления из губчатого порошка титана пористых вставок в ножку и чашку (рис. 5) тотального безцементного эндопротеза тазобедренного сустава системы SLPS [2], выпускаемого по настоящее время.

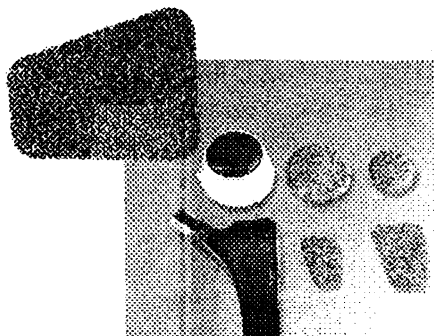


Рис. 5. Пористые вставки в детали эндопротеза тазобедренного сустава системы SLPS

6. Имплантаты позвонков и межпозвоночных дисков. В 2000 г. совместно с БелНИИ ТО разработана конструкция, технология и изготовлена опытная партия из губчатого порошка титана пористых имплантатов шейных позвонков и межпозвоночных дисков. В 2001-2002 г.г. созданы подобные имплантаты грудных позвонков. Конструкция имплантатов представлена на рис. 6.



Рис. 6. Имплантаты шейных и грудных позвонков, межпозвоночных дисков

Для первичной стабильной фиксации и скорой остеоинтеграции имплантата, а также минимальной травматизации прилежащих мягких тканей используется анизотропная пористость имплантатов – максимальная на опорных поверхностях и в теле имплантата и минимальная на боковой поверхности и в приповерхностном к ней слое.

7. Микрофильтры крови. В 1984–1986 г.г. ИПМ созданы фильтрующие материалы из порошков коррозионно-стойкой стали и титана, способные очистить кровь от микросгустков, образующихся при длительном хранении в результате биохимических процессов. Экспериментальные образцы прошли успешные испытания в Институте переливания крови. Испытания установили ряд преимуществ разработанных фильтров перед применявшимися в то время марлевыми и тканевыми: тонкость фильтрации — до 1–3 мкм, ресурс – многократно увеличен (со 100–200 мл до нескольких литров), регенерируемость и стерилизуемость. Однако открытие на рубеже 80–90-х годов вируса СПИДа, передающегося через кровь, связанные с этим ужесточения требований ВОЗ к системам переливания крови (в первую очередь — одноразовое применение) не позволили данной разработке, вследствие экономических причин (более высокой стоимости по сравнению с полимерными одноразовыми аналогами), широко внедриться в медицинскую практику.

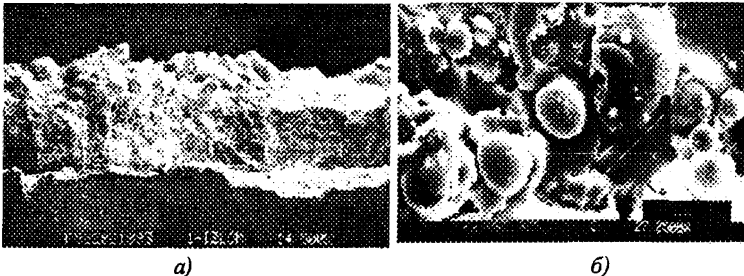


Рис.7. Сканограмма излома (а) и поверхности (б) композиционного биоактивного покрытия: гидроксипатит+ α -оксид алюминия

8. Технологии нанесения биосовместимых и биоактивных покрытий на детали имплантатов. ИПМ занимается разработкой технологии и нанесением биосовместимых (титан, оксид титана, оксид алюминия, оксид циркония) и биоактивных (трикальцийфосфат $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$, гидроксипатит $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$) покрытий на дентальные и ортопедические имплантаты [3]. Разработана технология напыления в аргоно-гелиевой плазменной струе биоактивного покрытия на титановые имплантаты из порошка гидроксипатита размером 0,5–45 мкм и конгломератов размерами 10–15 мкм из частиц α -оксида алюминия тех же размеров. Сканограмма

поверхности такого композиционного биоактивного покрытия представлена на рис. 6.

Введение α -оксида алюминия позволило на 30–50% повысить как прочность самого покрытия, так и его адгезию к поверхности титанового имплантата. Кроме того, дополнительно возросла и биоактивность за счет сохранения стехиометрического состава гидроксиапатита в напыленном покрытии.

Литература

1. Cameron H.U., Pillar R.M., Macnab I.: The effect of movement on the bonding of porous metall to bone// J. Biomed. Mater. Res., 1973, V.10, P.301–311.
2. Савич В.В. Разработка технологии изготовления и конструкции безцементного тотального эндопротеза тазобедренного сустава системы SLPS (Self Locking Porous System)// I Symposium Inzynieria Ortopedyczna i Protetyczna — IOP97. — Bialystok, 23–24 czerwca 1997. — S. 515–525.
3. Ilyuschenko A.Ph., Savich V.V.: Porous and Nonporous Titanium for Surgical Implants of Various Applications // Proceedings of the 1998 Powder Metallurgy World Congress & Exhibition — Granada, Spain, October 18–22, 1998. Vol.5. — P.352–354

УДК 615.844.6

ЗАВИСИМОСТЬ КОНЦЕНТРАЦИИ АЭРОИОНОВ ОТ ФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ

Кракаевич С.В., Криштапович А.М., Бондарик В.М., Осипов А.Н.

*Белорусский государственный университет
информатики и радиозлектроники
Минск, Беларусь*

Чистота и физико-химический состав воздуха во многом определяют продолжительность жизни человека. Поэтому проблема поддержания нормальных параметров воздушной среды всегда будет оставаться актуальной. К тому же, при развитии практически любого заболевания происходит нарушение обмена веществ в клетках организма, проявлением чего является уменьшение их отрицательного заряда. Это меняет коллоидное состояние клеток, препятствует выделению в кровотоки их содержимого и внутрисосудистому свертыванию крови. Отрицательный заряд клеток можно восстановить медикаментозными средствами или путем введения в организм воздуха с избытком отрицательных аэроионов. Эти аэроионы, поступая в кровь, разносят-

ся по всему организму, восстанавливая отрицательный заряд клеток, стимулируя обмен веществ и препятствуя агрегации тромбоцитов [1].

В воздушной среде города в зависимости от степени загрязненности содержится 50–500 отрицательно заряженных ионов/см³ [2]. Для поддержания нормальной жизнедеятельности человеческого организма необходимо по СанПиН РБ 9-98 минимум 600 ионов/см³.

При проведении исследований уровень ионизации воздушной среды определяли с помощью прибора АИМ-1, позволяющего одновременно измерять концентрацию положительных и отрицательных легких ионов. Диапазон измеряемых прибором концентраций легких аэроионов составляет 100 ... 1,9·10⁵ ион/см³ [3].

Для восстановления количества отрицательных аэроионов в воздушной среде до нормального используются различные системы генерации. Наибольшее применение получили электроэффлювиальные генераторы аэроионов, которые используются как для проведения физиотерапевтических процедур, так и для профилактических целей в производственных и жилых помещениях. Устройства для ионизации воздуха обычно состоят из излучателя аэроионов и высоковольтного блока питания, который представляет собой генератор напряжения с умножителем на выходе. В генераторах аэроионов применяют тиристорные электронные схемы либо транзисторные генераторы. Несмотря на более высокую конструктивную сложность, транзисторные схемы предпочтительнее вследствие малого коэффициента пульсаций высокого напряжения и, соответственно, более высокой эффективности образования легких аэроионов [4, 5].

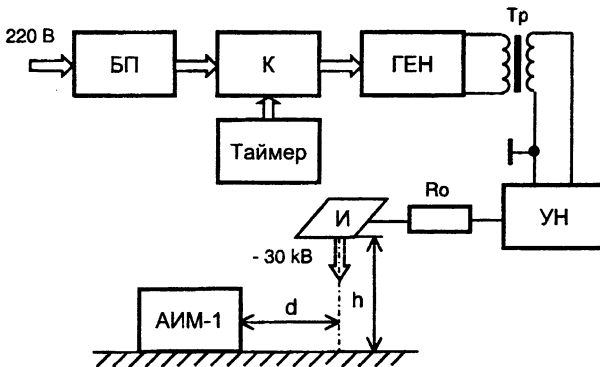


Рис. 1. Схема измерения уровня ионизации воздушной среды

Для исследований влияния физических параметров воздушной среды на концентрацию аэроионов была использована разработанная система генерации легких отрицательных аэроионов, электрическая часть которой (рис. 1) состоит из блока питания (БП), таймера, электронного ключа (К), генератора (ГЕН), повышающего трансформатора (Тр), умножителя напряжения (УН), ограничителя тока R_0 и излучателя (И).

Образование аэроионного потока в системе осуществлялось с помощью тихого разряда в воздухе вокруг излучателя, представляющего собой диэлектрическое основание с электропроводными иглками. При создании на излучателе высокого потенциала вокруг каждой из иглолок образуются плазменные области. На кончиках игл происходит максимальная концентрация электрического поля, что способствует возникновению аэроионов.

Механизм образования аэроионов следующий. Аэроионы образуются за счет потери электрона внешней орбитой ионизируемого атома или молекулы и связывания электрона нейтральным атомом или молекулой. Вокруг полученных при ионизации ионов сосредотачиваются нейтральные молекулы газа. В результате образуются так называемые «легкие» аэроионы с радиусом порядка 10^{-4} мкм. При соединении легких ионов с мельчайшими твердыми и жидкими частичками, взвешенными в воздухе, образуются «тяжелые» аэроионы с радиусом порядка 10^{-1} мкм. Легкие аэроионы, группируя вокруг себя молекулы воды, превращаются в промежуточные по величине «средние» аэроионы с уменьшением их активности и подвижности.

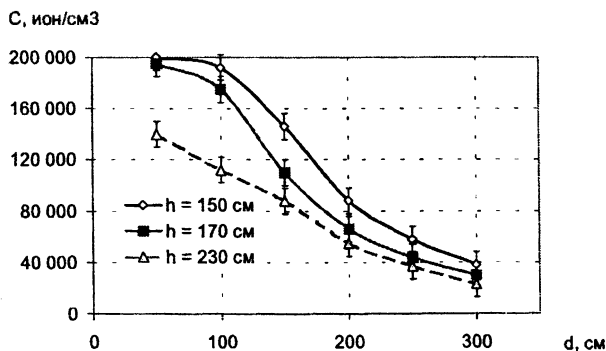


Рис. 2. Зависимости концентрации аэроионов от высоты h и расстояния d до излучателя

В ходе исследований было установлено (рис. 2), что с увеличением расстояния до излучателя уменьшается концентрация аэроионов. Можно пред-

положить, что образующиеся на излучателе «легкие» аэроионы в процессе диффузии в воздушной среде либо рекомбинируют, либо превращаются в «средние» и «тяжелые» с потерей подвижности.

Скорость падения концентрации аэронов увеличивалась с ростом относительной влажности воздуха и давления за счет увеличения вероятности образования малоподвижных аэроионов. Выявлен линейный характер уменьшения концентрации аэроионов с ростом относительной влажности при различных напряжениях на излучателе. При относительной влажности воздуха более 80 % происходило резкое падение концентрации аэроионов, так как с увеличением относительной влажности происходит преимущественное образование «тяжелых» аэроионов.

В пределах до 40°C заметного влияния роста температуры на концентрацию аэронов не выявлено. При дальнейшем увеличении температуры исследуемой среды при постоянном давлении и относительной влажности концентрация аэронов начинает снижаться за счет повышения вероятности столкновения и объединения «легких» и «средних» аэронов.

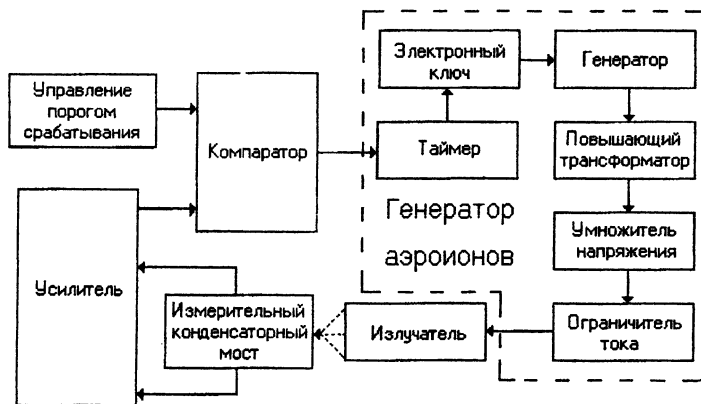


Рис. 3 Система восстановления аэроионного равновесия

При обычных условиях с течением времени постепенно уменьшалось количество «легких» аэроионов и росло «средних» и «тяжелых». Наличие задымления воздушной среды приводило к резкому сокращению количества «легких» аэроионов и резкому увеличению «средних». Это можно объяснить тем, что частицы дыма являлись дополнительными центрами адсорбции «легких» аэроионов. Дополнительная аэроионизация задымленной воздушной среды приводила к увеличению скорости исчезновения частиц дыма за счет увеличе-

ния вероятности взаимодействия «легких» аэроионов со «средними» и образования «тяжелых» аэроионов с последующим оседанием их на землю.

В процессе исследований была установлена корреляция содержания аэроионов в воздушной среде с геомагнитным состоянием Земли. В дни магнитных бурь концентрация аэроионов обеих полярностей в воздушной среде возрастала практически на порядок и составляла порядка 5000 ионов/см³. Рост концентрации аэроионов можно объяснить дополнительной ионизацией атмосферы частицами «космического ветра».

Для контроля и поддержания требуемого уровня концентрации аэроионов в воздушной среде была разработана система аэроионификации помещений с элементами обратной связи, которая обеспечивает автоматический контроль и поддержание на заданном уровне концентрации аэроионов (рис. 3).

Цепь обратной связи в системе используется для отслеживания минимального порога концентрации аэроионов, при котором необходимо запускать генератор для ионизации воздуха помещений. Эта обратная связь реализована посредством измерительного конденсаторного моста. Весь процесс ионизации воздушной среды помещений продолжается до тех пор, пока не завершена работа таймера. После этого происходит принудительное отключение питающего напряжения от генератора.

Основные технические данные разработанной системы: питание генератора осуществляется от сети 220 В, 50–60 Гц; ток потребления — не более 0,05 А; напряжение на электродах излучателя — до 30 кВ. Габаритные размеры высоковольтного источника 180х80х80 мм, масса — не более 1,0 кг.

Концентрация аэроионов в воздушной среде является наиболее эффективным показателем ее состояния. Установлено, что она в значительной степени зависит от физических параметров самой воздушной среды.

Таким образом, для наиболее комфортной жизнедеятельности человека необходимо поддерживать равновесие между количеством генерируемых аэроионов и факторами, способствующими их уничтожению. При росте влажности воздушной среды и давления, увеличении ее задымления, а также количества людей в помещениях необходимо искусственным путем повышать концентрацию аэроионов за счет использования различных ионизационных систем, например, разработанной системы восстановления аэроионного равновесия. Отсутствие устройств контроля количества аэроионов требует построения математических моделей распределения концентрации аэроионов в воздушной среде в зависимости от ее параметров.

Литература

1. Улащик В.С. // *Здравоохранение*. — 1998. — № 9. — С. 55–58.
2. Скипетров В.П. *Аэроионы и жизнь*. — М., 1995.
3. Счетчик аэроионов. Методическое руководство / Составитель Х.Ф. Таммет. — Хаапсалу. — 1985. — 44 с.
4. Аппаратура ионизации воздушной среды / Э.С. Кашицкий, А.Н. Осипов, В.М. Бондарик и др. // *Изобретатель*. — 2000. — № 7. — С. 20–22.

УДК 616-073.65

ИССЛЕДОВАНИЕ БИОФИЗИЧЕСКОГО МЕХАНИЗМА КОЛЛАТЕРАЛЬНОГО КРОВΟΣНАБЖЕНИЯ ЧЕРЕЗ МЕЖСИСТЕМНЫЕ АНАСТОМОЗЫ

²Гуминский А.М., ¹Куклицкая А.Г., ¹Олефир Г.И.

¹*Белорусский национальный технический университет,*

²*Минский городской клинический онкологический диспансер*

Минск, Беларусь

Раскрытие межсистемных анастомозов и образование коллатералей играет определяющую роль в процессе восстановления кровоснабжения тканей при его нарушениях вследствие ранений и травм, хирургического вмешательства, стенозирования и обтурации магистральных артерий.

Аппаратура и методы. С помощью автоматизированного термографического комплекса, разработанного в БНТУ [1], проведены исследования поверхностных тепловых полей 126 пациентов минского городского клинического онкологического диспансера с заболеваниями внутренних органов (сердца, легких, печени, желудка) как онкологического, так и неонкологического характера. Анализ полученных термограмм позволил сделать предположение о взаимозависимости кровотока в висцеральной (снабжающей кровью внутренний орган) и париетальной (снабжающей кровью участок кожи), артериях, отходящих от одного отдела аорты. При наличии межсистемных анастомозов, париетальная артерия может рассматриваться как коллатераль, осуществляющая дополнительное кровоснабжение внутреннего органа в случае недостаточности висцеральной артерии.

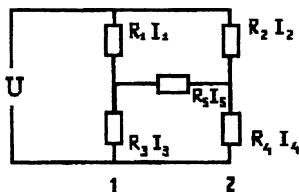
Для описания механизма коллатерального кровоснабжения через межсистемные анастомозы предлагается биофизическая модель, базирующаяся на следующих положениях:

1. Рассматривается участок кровеносной сети, представляющий собой две артериальные ветви, отходящие от одного отдела аорты, соединенные межсистемным анастомозом [2].

2. Интенсивность кровотока на выбранном участке сосудистой сети определяется как отношение величины сердечного выброса (давления крови) к гидродинамическому сопротивлению этого участка сети [3].

3. Сосудистая система представляется как система гибких эластичных трубок, течение крови по которым можно описать уравнениями, аналогичными уравнениям для расчета параметров электрических цепей постоянного тока.

Результаты и обсуждение. Две коллатерально взаимосвязанные артериальные ветви кровеносной системы (висцеральную 1, снабжающую кровью внутренний орган, и париетальную 2, снабжающую кровью периферическую часть организма человека, например, кожу), соединенные анастомозом, можно, по аналогии с электричеством, представить в виде следующей цепи постоянного тока:



Здесь $R = \eta l / 4\pi r^4$ — гидродинамическое сопротивление участка сосудистой сети, определенное формулой Пуазейля [3]. R_1, R_2 — гидродинамические сопротивления участков висцеральной 1 и париетальной 2 сосудистых ветвей от аорты до анастомоза (аортальных концов), R_3, R_4 — сопротивления терминальных (постанастомозных) концов артерий 1 и 2, включающие сопротивления капилляров и прекапиллярных артериол, R_5 — гидродинамическое сопротивление анастомоза. U — величина сердечного выброса. I_1, I_2 — кровотоки в аортальных концах сосудистых ветвей, I_3, I_4 — кровотоки в терминальных концах. I_5 — кровоток через анастомоз.

Для определения величины и направления кровотока через анастомоз, используем правила Кирхгофа для расчета электрических цепей постоянного тока, в итоге получим:

$$I_5 = \frac{(R_1 R_4 - R_2 R_3) U}{Z}, \quad (1)$$

где $Z = \sum_{i,j,k} R_i R_j R_k$ (i, j, k изменяются от 1 до 5).

Проанализируем выражение (1).

1. $I5 = 0$, то есть коллатеральный переток крови отсутствует, если $R1 = R3$ ($I1 = I3$) и $R2 = R4$ ($I2 = I4$). В этом случае перфузия капилляров ($R3, R4$), обеспечивающая нормальное функционирование органа, полностью уравновешивается вазодилатацией подводящих кровь артерий ($R1, R2$), зависящей, в свою очередь, от сердечного выброса U . Характерно для здорового организма в комфортных условиях. Перетока крови от париетальной артерии к висцеральной и наоборот нет.

2. $I5 > 0$, или $R1R4 > R2R3$. В данном случае кровь от париетальной артерии 2 через анастомоз перетекает к органу, снабжаемому кровью висцеральной артерией 1. Это может быть связано с уменьшением $R3$ при стабильных значениях $R1, R2$ и $R4$. Здесь имеет место увеличение перфузии капилляров органа, связанное с его гипертрофией или увеличенными нагрузками («спортивное» сердце или гипертрофия сердца у работников интенсивного физического труда, например) при стабильном сердечном выбросе и стабильной вазодилатации артерий. В другом случае, при неизменной перфузии капилляров $R3$, положительный кровоток через анастомоз может возникнуть из-за резкого уменьшения сердечного выброса и вазоконстрикции артерий, приводящей к росту $R1, R2, R4$ (при обострении ишемической болезни сердца, например).

3. $I5 < 0$, или $R1R4 < R2R3$. В данном случае имеет место коллатеральное перетекание крови от висцеральной артерии 1 к париетальной артерии 2. Наблюдается в условиях стабильного сердечного выброса при росте $R3$, связанным с уменьшением числа перфузируемых капилляров органа, снабжаемого кровью висцеральной артерией 1. Уменьшение числа перфузируемых капилляров может быть обусловлено органическими повреждениями ткани органа (разрушением функциональной ткани и замещение ее соединительной) вследствие перенесенных инфекций, воспалительных процессов, индукции тканей при лучевой терапии, некролизации тканей при инфаркте, а также при обширном опухолевом процессе — распаде тканей органа и опухоли.

В случае стенозирования и обтурации магистральной (висцеральной) артерии, кровоснабжение органа осуществляется за счет коллатералей. При этом диаметр анастомозов существенно увеличивается [4], а гидродинамическое сопротивление уменьшается (см. формулы выше). Частичная или полная резекция внутреннего органа и связанная с этим перевязка магистральной артерии вызывает резкое увеличение сопротивления терминального отдела сформировавшейся коллатерали и, соответственно, спазм париетальной

артерии, наблюдавшийся нами на термограммах даже по прошествии длительного времени после хирургического вмешательства.

Предварительное стенозирование висцеральной артерии приводит к раскрытию межсистемного анастомоза, увеличению его диаметра и уменьшению гидродинамического сопротивления, формированию полноценного коллатерального русла за счет париетальной артерии, что обуславливает благополучный исход последующей перевязки магистральной артерии в случае необходимости.

Выводы. Предложенная модель коллатерального кровоснабжения позволяет определить условия раскрытия межсистемных анастомозов и определить направление кровотока в них. Рассмотренный механизм хорошо объясняет известное в сосудистой хирургии явление спазма коллатералей при перевязке магистральных сосудов и необходимость предварительного стенозирования сосуда для лучшего исхода его полной перевязки впоследствии.

1. Кривицкий П.Г., Куклицкая А.Г., Михальчук О.В., Олефир Г.И., Русак А.А. Автоматизированный термографический комплекс для диагностики онкологических заболеваний./ 51 международная НТК БГПА. Тезисы докладов. — Минск. — 1995. — Т.4.

2. Синельников Р.Д. Атлас анатомии человека. Учение о сосудах. — М.: Медицина, 1992. — Т.3.

3. Физиология человека./Под ред. Р.Шмидта и Г.Тевса. М., Мир. — 1996. — Т.2.

4. Долго-Сабуров Б.А. Очерки функциональной анатомии кровеносных сосудов. — Ленинград: Медгиз, 1961.

УДК 617-089.844

БИОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ ИМПЛАНТАТОВ

В.В. Савич¹, А.И. Воронович²

¹ИПМ НАН Беларуси, ²БелНИИ ТО

Минск, Беларусь

С начала 60-х годов имплантирование искусственных сердечных клапанов и сосудов, искусственных хрусталиков глаза, гортанно—трахеальных эндопротезов, эндопротезов тазобедренного, коленного и других суставов, искусственных корней зуба является безальтернативным методом лечения тяжелых кардиологических, офтальмологических и отоларингических заболе-

ваний, патологий суставов, адентии путем замены, реконструкции или восстановления тканей или органов.

Имплантатом принято считать предмет (изделие специализированного производства), изготовленный из небиологического материала, который хирургическим путем вводят в организм для замещения утраченных функций в течение длительного времени [1]. Имплантат может быть полностью погружен в ткани (эндопротезы суставов, искусственные клапаны и сосуды) или проходить через поверхность кожи — так называемый чрезкожный имплантат (эндокардиальные электроды, стоматологические имплантаты, аппараты внешней фиксации переломов костей).

Все имплантаты можно условно разделить на временные (пластины, шурупы и другие фиксаторы) и постоянные, используемые для длительного выполнения функций (эндопротезы суставов, искусственные клапаны сердца, дентальные имплантаты и др.).

Имплантаты в организме используются:

а) для замены травмированной, больной или недоразвитой части скелета, в том числе и для полной замены суставов (эндопротезы суставов, фрагментов костных тканей конечностей);

б) для замены травмированной, больной или недоразвитой части сердечно—сосудистой системы, в том числе и для стимуляции утраченных функций (эндопротезы кровеносных сосудов, искусственные клапаны и сердце в целом, кардиостимуляторы и вживляемые электроды);

в) для замены травмированной, больной или недоразвитой части дыхательной системы (гортанны-трахеальные эндопротезы);

г) для замены утраченных зубов и фиксации переломов челюсти и черепа (стоматологические имплантаты, мини-пластины и мини-винты);

д) для соединения травмированных костных тканей и временного восстановления опорно-двигательных функций до момента заживления (пластины и винты остеосинтеза, спицы и винты аппаратов для внешней фиксации переломов);

е) для косметической коррекции недоразвитых частей тела (протезы молочных желез, лицевых тканей и т.п.);

ж) для восстановления функции зрения (имплантаты хрусталика и роговицы).

Имплантаты предоставляют врачу уникальную возможность лечения травм и заболеваний, неминуемо приводящих при другом способе лечения к полной или частичной инвалидности пациента (так как имплантаты могут выполнять в организме функции тех или иных органов и тканей) либо существенно сокращать сроки реабилитации.

Фиксация сложных переломов трубчатых костей, костей таза (в том числе и множественных, оскольчатых) осуществима лишь с помощью специальных наkostных компрессирующих пластин и винтов или аппаратов внешней фиксации (по типу Илизарова). Такой способ фиксации переломов принято называть **остеосинтез** [2]. Его важным преимуществом по сравнению с фиксацией гипсом является возможность начала движения в смежных суставах уже на 5–7 день после операции, что уменьшает вероятность развития контрактур, а также отсутствие давления на мышечные ткани и кровеносные сосуды (что на 15–30% ускоряет заживление перелома).

Одним из важных и наиболее существенных достижений в медицине второй половины XX века стало замещение разрушенных или поврежденных суставов эндопротезами. Эта операция по степени улучшения качества жизни признана одной из наиболее эффективных наряду с вмешательством на сердце и сосудах, восстановлении зрения.

По данным ВОЗ ежегодно только в США выполняется до 400 тыс. имплантаций эндопротезов тазобедренного и 150 тыс. коленного суставов. В Западной Европе эти цифры достигают 300 тыс. и 100 тыс. соответственно. Количество операций остеосинтеза по данным ВОЗ превышает несколько миллионов в год. Количество ежегодных стоматологических имплантаций вообще не поддается точному учету, а по прогнозам достигает десятков миллионов единиц.

Целью данной работы является попытка сформулировать некоторые общие биомеханические принципы конструирования имплантатов.

Способность имплантата активно выполнять свои функции в течение длительного времени (от 10–12 месяцев для пластин остеосинтеза до 15–20 лет для эндопротезов тазобедренного и коленного суставов) во многих отношениях определяется свойствами материала имплантата и состоянием его поверхности, проявляющимся во взаимодействии с окружающими тканями и биологическими жидкостями. В этой связи большое значение для имплантата имеет не только выполнение им механических или физиологических функций, но и приспособляемость к нему окружающих тканей и жидкостей.

Проблема совместимости организма и имплантата имеет важнейшее значение и решающее влияние на последующую стабильность компонентов эндопротеза в ткани и носит всеобщий характер [4].

Различают в этой связи три понятия: биоинертность, биосовместимость и биоактивность.

Биоинертность — это свойство имплантата, при котором отсутствуют взаимодействие и какие-либо реакции живых тканей на материал имплантата и сам имплантат в целом, а также ткани и жидкости не оказывают влияния

на поверхность, микроструктуру и комплекс физико-механических свойств материала. В этом смысле биоинертны благородные металлы — золото, платина, тантал, а также керамика на основе оксидов и нитридов алюминия и кремния, углеродные материалы и композиты на их основе. Из полимеров биоинертным можно считать лишь тефлон или фторопласт. Уровень физико-механических свойств большинства перечисленных материалов невысок, вследствие чего они имеют ограниченное распространение.

Биосовместимость — это состояние материала, когда при ограниченном взаимодействии с прилегающими тканями и жидкостями организма, он оказывает на них минимальное токсическое или пирогенное влияние, а также сохраняет максимально длительное время свои собственные физико-механические и иные свойства, необходимых для исполнения функций. Биосовместимыми являются сплавы титана, кобальт-хром-молибденовые сплавы, а также коррозионно—стойкие сплавы с содержанием хрома 20–24%, дополнительно легированные молибденом. Эти металлы имеют наиболее высокий комплекс механических свойств и широко используются для производства наиболее нагруженных ортопедических и стоматологических имплантатов. В последнее время состояние «биосовместимости» стали рассматривать в более широком смысле и дополнять способностью материала за счет физико—химического состояния поверхности, ее микроструктуры (шероховатости и пористости, сопоставимой с размерами и структурой соответствующих клеток костных или иных тканей), за счет специальной формы и размеров деталей имплантата обеспечивать повышенную адгезию (сцепление) имплантата с окружающими тканями и, тем самым, повышенную стабильность и, в определенном смысле, «врастание» или «встраивание» имплантата в организм. Такой способностью обладает оксидированные и текстурированные титановые сплавы, а также металлы из указанного перечня с напыленным или припеченным пористым покрытием из титанового порошка, волокна, сетки [5]. Биосовместимость в этом смысле определяется состоянием поверхности материала в целом — его микро- и макрошероховатостью, электрическим потенциалом, смачиваемостью биологическими жидкостями, адгезией к остеонам и массой других факторов, которые на сегодняшний день теоретически и эмпирически описать не представляется возможным.

Биоактивность — это способность материала в целом (или, по крайней мере, его поверхности) вступать в активный биологический процесс, например, минеральный обмен с окружающими тканями (преимущественно костными), образуя прочную химическую связь «имплантат—ткань», которая призвана способствовать высокой стабильности имплантата. Нанесение на

детали из биосовместимых металлов тонкослойных биоактивных покрытий трикальцийфосфата, гидроксилapatита давало великолепный результат — за счет химических реакций минерального обмена указанных материалов с костной тканью уже через полгода вся поверхность имплантата имела с нею плотный контакт [7]. Однако уже через 5–8 лет, оно практически полностью переходит в костную ткань, обнажая металлическую поверхность, либо от нее отслаивается [8]. Поэтому на сегодняшний день проблема создания биоактивных материалов и покрытий, готовых деталей имплантатов из них, способных к длительному и адекватному воспроизведению функций в организме, окончательно еще не решена.

Успех имплантации определяется рядом факторов, главным из которых является биомеханическое соответствие имплантата окружающим тканям.

Биомеханика — наука, изучающая физические и функциональные особенности живого организма в целом и составляющих его отдельных систем, нагрузках в этих системах, возникающих в процессе движения, об их последствиях, о собственно механизмах движения.

Различают следующие прикладные варианты общей биомеханики:

— инженерная, предметом которой и является, в первую очередь, конструирование рациональных имплантатов, приборов и оборудования для гемодиализа, искусственного дыхания и кровообращения;

— медицинская, предметом которой является изучение механических и физиологических причин заболеваний и травм;

— спортивно–реабилитационная, которая исследует и разрабатывает оптимальные методики восстановления опорно–двигательного аппарата, системы кровообращения, нервной системы после травм и заболеваний, а также методики и тренажеры для оптимизации функциональных возможностей указанных систем.

Исторически первым предметом изучения в биомеханике явился скелет человека, механические свойства костей и мышечных тканей, распределение нагрузок на конечности и, в особенности на суставы, при ходьбе и других видах движения. Это связано с требованием скорейшей реабилитации больных с травмами и заболеваниями опорно–двигательного аппарата, так как в противном случае пациенты обречены на неподвижность, вызванные ею атрофию мышц, гиподисфункцию кровеносных сосудов, застойные и воспалительные процессы, которые не только ведут к инвалидности, но даже и к смерти пациента. Кроме того, еще в 20-е и 30-е годы появились первые ортопедические имплантаты для интрамедулярного и накостного остеосинтеза — гвозди Смит–Петерсена, пластинки Венабля и др., для эффективного применения которых потребовались исследования механики деформации кости и металла [1].

Еще одно направление биомеханики — исследование гидродинамических характеристик потока крови в эндопротезах сосудов, искусственных клапанах сердца, аппаратах гемодиализа и т.п.

После широкого распространения с конца 60-х годов винтовых и пластинчатых чрезкостных зубных имплантатов в биомеханике выделилось направление исследований распределения нагрузки на челюсть, поведения зуба и имплантата при асимметричном приложении сил.

Новейшее, выделившееся в отдельное направление ортопедической биомеханики — трибология естественного и искусственного сустава — исследование характеристик трения и износа суставов человека, а также замещающих их эндопротезов, в первую очередь тазобедренного и коленного, как самых нагруженных, опорных.

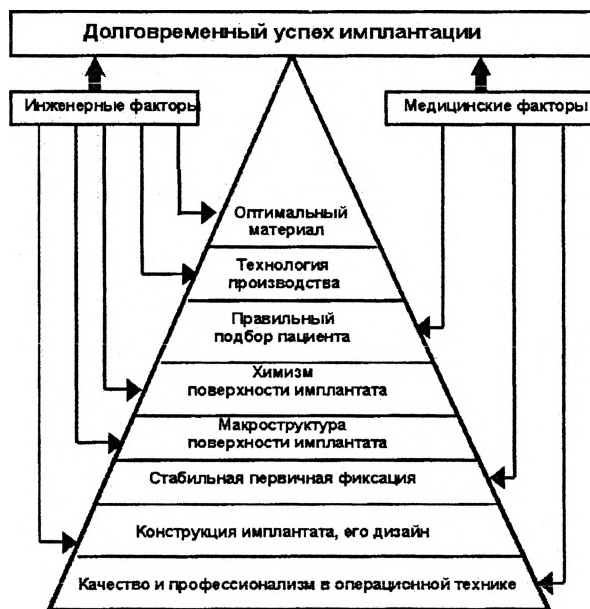


Рис. Факторы, определяющие долговременный успех имплантации

На рисунке представлена доработанная нами диаграмма, иллюстрирующая по мнению профессора Венского университета К.Цваймюллера и директора отделения имплантатов фирмы «Зульцер» доктора М.Землича [6], значимость факторов, обеспечивающих долговременный успех в имплантации вообще и эндопротезов тазобедренного сустава в частности. Степень

значимости факторов, пропорциональна ширине ячейки на диаграмме, приведенной на рисунке.

Из рисунка видно, что согласно современным представлениям биомеханики имплантата лишь три из восьми факторов, определяющих его длительную стабильность в организме медицинские — это операционная техника и подбор пациента, а остальные — чисто инженерные.

При всем многообразии направлений современной биомеханики можно выделить несколько общих принципов конструирования имплантатов.

1. Анатомичность — соответствие имплантата естественным или приобретенным в результате заболевания форме и размерам замещаемой структуры.

2. Биосовместимость или биоинертность материала имплантата.

3. Адекватность — наибольшее соответствие механических и физико-химических свойств имплантата свойствам прилежащих тканей.

4. Атравматичность — минимальное повреждение или щадящее удаление прилежащих тканей в процессе имплантации и функционирования эндопротеза.

5. Функциональность — наиболее полное и безболезненное воспроизведение имплантатом функции естественных замещенных тканей или органа в максимально приближенном к здоровому состоянию объеме с минимальными энергетическими затратами.

6. Интегрируемость — прочное сцепление, «сращивание» имплантата с прилежащими тканями за счет формы, макроструктуры и состояния его поверхности.

7. Стабильность — длительное функционирование деталей и компонентов имплантата как можно более длительный срок без коррозии, усталостного, абразивного и иных видов износа, без токсикации организма продуктами последних.

Литература

1. Имплантаты в хирургии/ Вильямс Д.Ф., Роуф Р. — М.: Медицина, 1972. — 552 с.
2. R.Texhammer, C.Colton. AO/ASIF Instrumente und Implantate. — Springer-Verlag: Berlin-Heidelberg, 1995. — 564 S.
4. Total joint replacement/ W.Petty. — Philadelphia: W.B.Sauders Inc., 1991. — 814 p.
5. Bobyn J.D., Pillar R.M., Cameron H.U., Weatherly G.C.: The optimum pore size for the fixation of porous-surfaced metal implants by the ingrowth of bone. — Clin.Orthop. — 1980. — В.150. — P.263–270.

6. Semlitsch M.: Stand der Werkstofftechnik des Zweymueller-Hueftprothesensystems nach 10 Jahren klinischer Praxis. In: 10 Jahre Zweymueller-Hueftendoprothese. Huber, Bern; Stuttgart; Toronto, 1990, S. 14–22.

7. Stephensen P.K., Freeman M.A.R., Revell P.A. and all.: The effect of hydroxyapatite coating on ingrowth of bone into cavities in an implant. J. of Arthroplasty, 1991, V.6, N1, P.51–58.

8. Lennox D.W., Schofield B.H., McDonald D.F.: A histologic comprasion of aseptic loosening of cemented, press-fit, and biologic ingrowth prostheses. — Clin.Orthop. — 1987. — B.225. — P.171–179.

УДК 615.47

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КОМПЛЕКСА МНОГОКАНАЛЬНОЙ СТИМУЛЯЦИИ СКЕЛЕТНЫХ МЫШЦ

Сеньковский К.Г., Осипов А.Н.

*Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Минск, Беларусь*

Современные системы электростимуляции скелетных мышц человека должны удовлетворять широкому спектру требований: многоканальность, различные виды стимулирующего сигнала, наличие обратной связи, возможность получения, анализа и хранения диагностической информации, удобный интерфейс и интуитивно понятное управление, безопасность и др.

Одним из перспективных подходов является создание систем электростимуляции с использованием современных компьютерных технологий. Современные персональные компьютеры (ПК) предоставляют возможность быстрого подключения внешних устройств, большое разнообразие средств и методов написания программного обеспечения. Это позволяет реализовать обмен с устройствами ввода-вывода информации, обработку этой информации, ее упорядоченное хранение и дальнейшие преобразования.

Возможны два варианта построения систем: использование мультипроцессорной системы, в которой интерфейсные функции разделены с функциями управления стимулятором или использование мощной однопроцессорной системы. Реализация второго варианта сопряжена с определенными трудностями и значительными финансовыми затратами. Более приемлемым является второй вариант, в котором низкоуровневые функции управления сти-

мулятором возлагаются на внешний микропроцессор (МП) или микроконтроллер (МК). Целесообразным является использование в качестве внешних PIC-микроконтроллеров, основными достоинствами которых, являются доступность и дешевизна при широком ассортименте и функциональности.

При разработке системы возникает задача выбора интерфейса для обмена информацией между ПК и внешним МК. Возможно использование внешних портов или изготовление оригинального адаптера, встраиваемого в ПК. Последний применяется в силу необходимости, когда использование стандартных каналов передачи информации невозможно (высокая скорость обмена, сложная конфигурация системы и т.д.) [1]. Последовательный порт компьютера (COM-порт) — один из самых широко распространенных интерфейсов, который обеспечивает достаточную для электростимулятора скорость обмена. Более перспективным является USB-порт, допускающий «горячее» подключение. Однако для его использования необходимы специализированные интерфейсные микросхемы. В связи с этим, обмен данными между аппаратной частью комплекса и ПК реализован через последовательный порт компьютера.

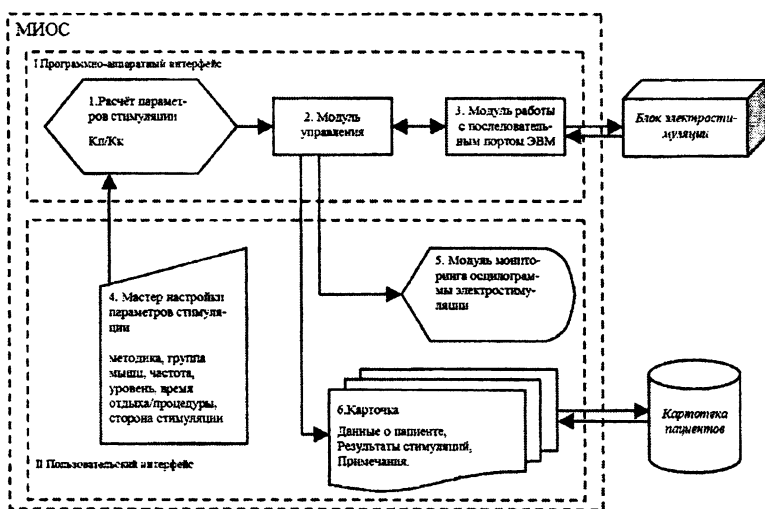


Рис. 1. Структура программного обеспечения комплекса электростимуляции

Разработано программное обеспечение программно-аппаратного комплекса с биотехнической обратной связью (БТОС) для стимуляции скелетных мышц человека, позволяющее синтезировать сигналы стимуляции с огнбаю-

ними на основе эталонных миограмм и осуществлять их вывод синхронно с аудиовизуальными показателями. Структура ПО представлена на рис. 1.

Три основных составляющих ПО — это картотека пациентов (в которую вносятся его личные данные и информация медицинского назначения: диагноз, примечания врача, вид и параметры проводимой процедуры, история проведения процедур, информация об эффективности проводимых процедур), пользовательский интерфейс (позволяет работать с картотекой, задавать параметры процедуры, просматривать результаты процедур, запускать процедуру, осуществлять вывод аудиовизуальной информации) и программно-аппаратный интерфейс (обеспечивающий обмен информацией между ПК и стимулятором).

Алгоритм работы врача с ПО следующий. Создается новая карточка пациента или выбирается существующая из базы данных (БД). Далее для начала процедуры необходимо последовательно ввести все параметры стимуляции (возможность задания неверных или неопределенных значений исключается). В качестве параметров процедуры, используются: методика стимуляции (верхних, нижних конечностей, Хафшмидта, сложное движение руки) и все параметры (последовательность мышц, длительности посылок, отдыха и всей процедуры), род стимулирующего тока (прямоугольные, остроконечные импульсы, синусоидальный), частота модулирующего сигнала (непрерывный, 33, 50, 75, 100 Гц); проводится электродиагностика. Важным аспектом являются параметры стимулирующего воздействия (частота, форма, амплитуда, длительность воздействия и т.д.). Необходимо, чтобы электрический сигнал по своему физиологическому действию был адекватен естественным сигналам, вызывающим активность мышц. Известен метод [2], когда в качестве огибающей стимулирующего сигнала применяется естественная электрическая активность мышц донора. Однако, несмотря на достижения в области обработки сигналов, реализация данного подхода сопряжена с определенными трудностями — необходимо обеспечить высокую помехоустойчивость, не точно определены параметры интегрирования миограммы и т.д. В связи с этим, предложено использовать программный синтез сигналов на основе эталонных интегрированных миограмм. Обработка эталонных миограмм выполнена на этапе разработки ПО на основе анализа спектральных характеристик. Выбор огибающей осуществляется по конституционному, возрастному признакам, с учетом степени поражения мышечных групп на основании результатов электродиагностики.

Программно-аппаратный комплекс позволяет реализовать двухконтурную обратную связь [3,4]. По контуру биотехнической обратной связи передаются электрические параметры, характеризующие биологическое состоя-

ние объекта. На основе данной информации в соответствии с целевой функцией, ПО автоматически корректирует в реальном масштабе времени сигнал воздействия на пациента. Таким образом, осуществляется согласование параметров биообъекта и технических компонентов системы, выработка оптимального лечебного воздействия. Контур биологической обратной связи, основной задачей которой является обучение саморегуляции, представляет пациенту текущие значения его физиологических параметров и демонстрирует вызванное, соответствующее сокращаемым группам мышц, движение синхронно с подаваемым сигналом. Таким образом, достигаемый терапевтический эффект помимо физиологической составляющей обусловлен и значительной положительной психоэмоциональной составляющей.

Работа программы осуществляется под управлением операционной системы Windows и имеет удобный интерфейс. Обмен данными между аппаратной частью комплекса и ПК реализован через последовательный порт компьютера. Разработанное программное обеспечение не требует больших навыков работы на ПК и значительно упрощает проведение комплекса реабилитационных мероприятий.

Литература

1. Применение универсального последовательного интерфейса USB в компьютерных медицинских комплексах / Е.И. Ветвицкий, А.В. Плотников, Д.А. Прилуцкий, С.В. Селищев // Медицинская техника. — 2000. №4. — С. 3–8.

2. «Миотон» в управлении движениями / Алеев Л.С., Вовк М.И., Горбачев В.Н., Шевченко А.Б. — Киев: Наук.думка, 1980. — 144с.

3. Осипов А.Н., Сеньковский К.Г., Дик С.К. Сложная биотехническая обратная связь в системах электростимуляции // Труды научно-практич. конф. «Электростимуляция — 2002». — М.: ЗАО «ВНИИМП-ВИТА» (НИИ медицинского приборостроения РАМН), 2002. — С. 269–274.

Система с биотехнической обратной связью для электростимуляции скелетных мышц / А.Н. Осипов, С.К. Дик, Ю.Г. Дегтярев, К.Г. Сеньковский // Проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств: Матер. II Международ. научно-техн. конф. — Новополюцк: ПГУ, 2002. — Т. 1. — С. 244–247.

АНИЗОТРОПНО-ПОРИСТЫЕ ИМПЛАНТАТЫ СВРІ И ТВРІ ИЗ ГУБЧАТОГО ПОРОШКА ТИТАНА ДЛЯ МЕЖТЕЛОВОГО СПОНДИЛОДЕЗА В ШЕЙНОМ И ГРУДНОМ ОТДЕЛАХ ПОЗВОНОЧНИКА

**В.В. Савич¹, М.В. Тумилович¹,
Е.Д. Белоенко², А.В. Бабкин², А.Н. Мазуренко²**
*¹ИПМ НАН Беларуси, ²БелНИИ ТО
Минск, Беларусь*

Передний спондилодез позвоночника — эффективный метод хирургического лечения целого спектра патологических состояний позвоночника, таких как опухоли, локализующиеся в 80% случаев в телах позвонков, дегенеративно-дистрофические поражения, осложненные стенозированием позвоночного канала, а также оскольчатые переломы и другие повреждения позвоночника. Для хирургического лечения указанных заболеваний используются трансплантаты трех типов: аллотрансплантаты (заимствованные у трупов и обработанные химическими растворами фрагменты костных тканей), аутооттрансплантаты (взятые у оперируемого пациента фрагменты здоровых костных тканей) и имплантаты (искусственные объекты, получаемые из биосовместимых материалов). Анатомически предпочтительная форма трансплантата, замещающего позвонок и межпозвонковый диск — круглый в плане диск с лыской на задней кромке. Аналогичную форму должен иметь и имплантат.

Аллотрансплантаты не обладают таким остеогенным потенциалом, иммунологической совместимостью, как аутооттрансплантаты. При этом оба вида трансплантата требуют проведения дополнительной фиксации пластинами, винтами, нитями, проволокой и т.п., а также не обеспечивают восприятия механической нагрузки в течение длительного времени после проведения операции. Кроме того, происходит потеря прочности трансплантата в процессе его перестройки или разрушения в случае рецидива опухоли, что приводит к вторичной деформации оперированного сегмента.

Имплантаты не имеют указанных выше недостатков, в связи с чем получают все большее распространение в хирургической практике по всему миру. При этом пористые имплантаты, выполненные из механически прочных, биоинертных или биосовместимых материалов, обеспечивают прорастание костной ткани, не требуют дополнительной фиксации.

Цель настоящей работы — разработать биосовместимые имплантаты из пористых материалов для замещения дефектов тел позвонков при опухоле-

вых, дегенеративных и травматических поражениях позвоночника, разработать технологию их производства.

В ряде работ исследовались принципы выбора материала для изготовления деталей имплантатов. Показано, что как с точки зрения оптимума механических свойств (в первую очередь, соответствия упругих характеристик материала имплантата и живой кости), так и с точки зрения биосовместимости (под которой понимается не только отсутствие какого-либо токсического или пирогенного воздействия на живые ткани, но и физико-химическое сходство поверхности материала костной ткани) наиболее оптимальными являются титановые сплавы [1–2].

Для стабильности и фиксации имплантата в организме применялись различные способы — от костного цемента — полиметилметакрилата до сращивания кости и поверхности металла (остеоинтеграции или остеогенеза) путем придания последней определенного комплекса физико-химических и иных свойств, увеличения площади контакта нанесением пазов, рифлений, абразивно-струйной обработкой.

Успехи применения имплантатов в 70-е годы связаны, в первую очередь, с применением пористых структур — напыленных или припеченных слоев порошка, волокон, сетки и т.п. на поверхности имплантатов и экспериментально подтвержденным врастанием — *ingrows* в них костных тканей. Для достижения остеоинтеграции требуется плотный контакт кости с металлической поверхностью и стабильная первичная фиксация [3–4].

Широко используются американскими фирмами «Biomat», «DePui», «Howmedica», а также германской фирмой «Aesquilar» технология плазменного напыления тонких (0,8–1,2 мм) пористых покрытий из сферического или несферического порошка титана.

У разных авторов имеются различные мнения по вопросу, какой же размер пор имплантата является оптимальным, а также, какая форма частиц предпочтительна для образования наиболее устойчивых костных структур. Исследования фирмы Aesquilar, а также наши собственные результаты, позволили установить оптимальный средний размер пор имплантатов, обеспечивающий максимальную силу удержания его в костных тканях — 95–250 мкм [4].

Гистологические исследования титановых пористых имплантатов, проведенные как нами, так и специалистами швейцарской фирмы Sulzer Medica, позволили установить эффект влияния состояния поверхности пор на процесс врастания — *ingrowth* в них костной ткани [5–6]. В случае идеально гладких сферических частиц костные ткани просто заполняют поровое пространство, удерживаясь в нем преимущественно за счет переплетения и заклинивания в гофрированных порах. В случае губчатых частиц с шероховатой

и микропористой поверхностью костные ткани образуют тесную интимную связь с металлической поверхностью.

При изготовлении имплантатов для замещения шейных и грудных позвонков, межпозвоночных дисков используется порошок титана марки ПТХ, который применяется при производстве пористых вставок эндопротезов тазобедренного сустава системы «SLPS» [4], прошел токсические и санитарно-гигиенические испытания и разрешен к применению в клинической практике Министерства здравоохранения Республики Беларусь.

Для проведения клинических испытаний были изготовлены экспериментальные образцы имплантатов шейных позвонков и межпозвоночных дисков из порошка титана марки ПТХ. Внешний вид имплантатов представлен на рис. 1.

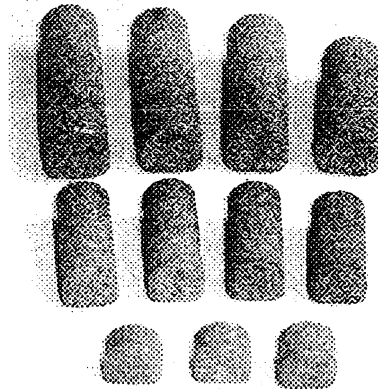


Рис. 1. Внешний вид имплантатов шейных и грудных позвонков, межпозвоночных дисков

Предварительные результаты исследований показали, что выбранный материал, конструкция и технология изготовления имплантатов шейных позвонков и межпозвоночных дисков из порошка титана марки ПТХ пригодны для использования в клинической практике для замещения дефектов шейного отдела позвоночника. На 01.08.2002 с использованием опытной партии имплантатов в клинике БелНИИ ТО успешно проведены 13 операций. 11 — на шейном отделе и 2 — на грудном. Интраоперационных осложнений не наблюдалось. Изучены ближайшие результаты операции, которые свидетельствуют о хорошей биосовместимости, адекватности и анатомичности имплантатов.

Пористость образцов 0,45–0,60, средние размеры пор 90–110 мкм. Для первичной стабильной фиксации и скорой остеоинтеграции имплантата, а также минимальной травматизации прилежащих мягких тканей использует-

ся анизотропная пористость имплантатов — максимальная на опорных поверхностях и в теле имплантата и минимальная на боковой поверхности и в приповерхностном к ней слое (рис.2).

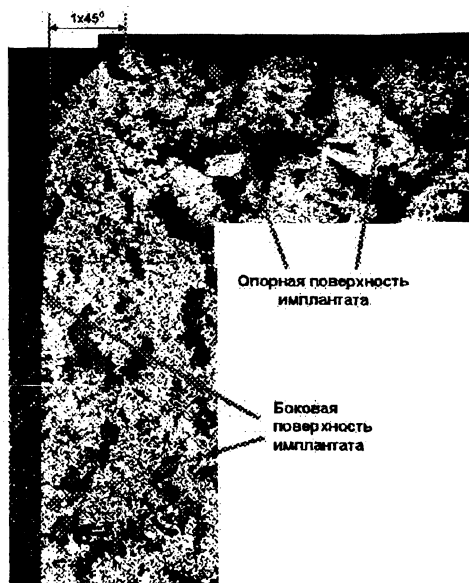


Рис.2. Панорама поперечного шлифа пористого имплантата позвонка грудного (шейного) отдела. $\times 40$

На рис. 3 представлена рентгенограмма имплантата CVPI.

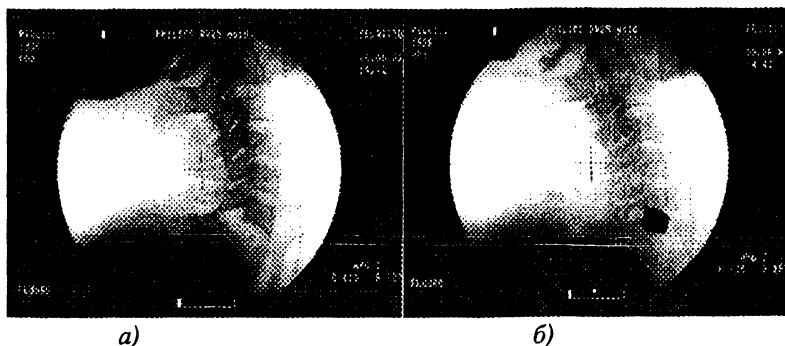


Рис.3. Рентгенограмма больного П. с переломо-вывихом 6-го шейного позвонка до операции (а) и после вправления переломо-вывиха стабилизации имплантатом CVPI

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате экспериментов установлено, что пористые имплантаты, изготовленные из губчатых частиц порошка титана, обладают при одинаковой пористости и размерах пор большей адгезией к костным тканям. В пористых имплантатах из гладких сферических частиц костная ткань не имеет плотного контакта с поверхностью металла, а лишь заполняет объем пор.

Изготовлены экспериментальные образцы имплантатов шейных позвонков и межпозвонковых дисков из губчатого порошка титана марки ПТХ. Пористость образцов составляла 0,45–0,60, средние размеры пор 90–110 мкм. Для первичной стабильной фиксации и скорой остеоинтеграции имплантата, а также минимальной травматизации прилежащих мягких тканей используется анизотропная пористость имплантатов — максимальная на опорных поверхностях и в теле имплантата и минимальная на боковой поверхности и в приповерхностном к ней слое.

Результаты исследований показали, что выбранный материал, конструкция и технология изготовления имплантатов пригодны для использования в клинической практике для замещения дефектов шейного и грудного отделов позвоночника.

Литература

1. Bensmann G.: Welcher Werkstoff ist fuer welche Endoprothese geeignet? Versuch einer Werkstoffeignungsbewertung am Beispiel von Hueftendoprothesen. Tech. Mitt. Krupp., 1992, N1, S.45–69.
2. Thull R.: Implantatwerkstoffe fuer die Endoprothetik. Schiele & Schoen, Berlin, 1978.
3. Hahn H, Palich W.: Preliminary evaluation of porous metal surfaced titanium for orthopedic implants. J. Biomed. Mater. Res., 1970, V.4, P.571–577.
4. Савич В.В.: Разработка технологии изготовления и конструкции безцементного тотального эндопротеза тазобедренного сустава системы SLPS (Self Locking Porous System)// I Symposium Inzynieria Ortopedyczna i Protetyczna — IOP'97. — Bialystok, 23–24 czerwca 1997. — S.515–525.
5. Story B.J., Wagner W.R.: New enhanced coating for dental implants// Sulzer Technical Review. — 1998. — N1. — P.38–40.
6. Ilyushenko A.F., Savich V.V., Voronovich A.I.: Effect of macro- and microstructure of titanium implants surfaces on their adhesion to bone tissue// Abstracts of the international conference «Advanced Materials». Kiev, Ukraine, 4–7 October, 1999. P.361.

УДК 378:371.3:618.3

ПРИМЕНЕНИЕ СЕТЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В РАЗРАБОТКЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ПРИЛОЖЕНИЙ

Разоренов Д.Н., Разоренов Н.А.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

Программирование, используя технологии распределенных объектов (DCOM, CORBA), интерфейсов и аппаратно-независимых реализаций, позволяет создавать высокотехнологичные приложения, которые осуществляют интеграцию взаимодействующих информационных систем, основанных на технологии WWW, друг с другом и с существующими крупными гетерогенными распределенными средами, являющимися характерной чертой большинства образовательных организаций.

Введение.

Рост популярности глобальной сети Internet и технологии World-Wide-Web в последнее время вызывает повышенный интерес к ним со стороны разработчиков информационных систем. Изначально WWW создавался только как средство, предоставляющее графический интерфейс в Internet и упрощающее доступ к информации, распределенной по миллионам компьютеров по всему миру. При этом, основными компонентами являлись страницы, узлы, броузеры и сервера Web. Пользователям была предоставлена возможность навигации по Internet с использованием технологии гипертекста, поддерживаемой протоколом HTTP (Hypertext Transfer Protocol) и стандартом языка HTML (Hypertext Markup Language).

Появление CGI (Common Gateway Interface) решило проблему обмена информацией между сервером Web и такими программами как базы данных, которые не могут непосредственно обмениваться данными с броузерами Web. В результате появилась возможность реализации интерактивного взаимодействия конечного пользователя с программами стороны Web сервера, которые обрабатывали информацию, введенную пользователем в броузере, и в качестве результата возвращали сформированную HTML-страницу. Многие из существующих решений доступа к БД в среде Internet основаны на данном подходе.

Появление языка Java предоставило для разработчиков информационных систем абсолютно новые технологические решения построения приложений в среде Internet/Intranet (не стоит, однако, рассматривать Java только как часть технологии WWW, поскольку она позволяет решать задачи гораздо более широкого класса, чем технология, базирующаяся на языке HTML, протоколе HTTP и CGI).

Но как быть в случае взаимодействующих информационных систем, основанных на технологии WWW. Как осуществить интеграцию этих систем друг с другом и с существующими крупными информационными системами? Существуют различные решения этой проблемы, в основе которых лежит модель распределенных объектных технологий. Выбор такой модели во многом определяет характеристики строящейся информационной системы.

Известно, что распределенная информационная система состоит из совокупности взаимодействующих друг с другом программных компонент. Каждая из таких компонент представляет собой программный модуль, исполняемый в рамках отдельного процесса. Использование объектно-ориентированного подхода при создании крупных информационных систем позволяет рассматривать компоненты информационной системы на различных уровнях абстракции как объекты, каждый из которых обладал бы определенной линией поведения. Взаимодействие таких объектов, в большинстве случаев, осуществляется на базе некоторой среды взаимодействия, основной целью которой является реализация механизма обмена сообщениями в контексте гетерогенных распределенных сред, являющихся характерной чертой большинства крупных организаций.

Построение среды взаимодействия, есть один из труднейших этапов разработки информационной системы. Как показывает практика, создание разработчиками информационных систем собственной, уникальной среды взаимодействия объектов приводит с одной стороны к резкому увеличению затрат на реализацию проекта построения информационной системы, а с другой к неполноте (ущербности) полученного решения. Исследования проектов создания информационных систем позволяют сделать вывод, что для того чтобы избежать неоправданных затрат на разработку собственной, уникальной информационной среды, необходимо использовать уже существующие программные продукты, которые относятся к уровню промежуточного программного обеспечения (middleware) и реализуют так необходимые среды взаимодействия. Однако не все продукты уровня middleware могут использоваться в качестве среды взаимодействия объектов крупной информационной системы. Это обусловлено тем, что одним из основных требований к крупной информационной системе является использование программных продуктов и технологий, удовлетворяющих международным и промышленным стандартам в области открытых информационных систем. На сегодняшний день многие компании и производители поглощены прорывом в области Интернет-ориентированных распределенных клиент/сервер образовательных систем, основанных на модели распределенных объектов. Т.е. постепенно происходит выделение логических компонентов программных продуктов, для

более рационального их использования. Система, построенная по технологии распределенных объектов, состоит из набора компонент (объектов), взаимодействующих друг с другом. При этом объекты, как правило, разбросаны по сети и выполняются отдельно друг от друга. Это позволяет отречься от необходимости иметь так называемое рабочее или учебное место, что позволяет развить дистанционное образование.

Преимущества использования

Использование технологии распределенных объектов позволяет пользоваться всеми преимуществами объектно-ориентированного подхода:

1. сокращение времени разработки (изолированная разработка)
2. сокращение количества ошибок
3. повторное использование программных компонент
4. легче становится будущее изменение системы.

Еще одним важным достоинством таких систем является возможность построения так называемых легких (тонких) клиентов.

Повторное использование кода

У программистов появляется возможность быстро и эффективно создавать многофункциональные приложения, используя уже существующие plug-and-play компоненты, что заметно снижает стоимость построения новой системы. На данный момент, все программные продукты серии тестирования обладают некоторыми сходными чертами, что наталкивает на мысль о создании общих модулей, подключаемых в каждую конкретную программу с минимум изменений.

Изолированная разработка

Из-за своей модульной основы распределенные приложения позволяют осуществить изолированные друг от друга создание и изолированное изменение модулей (компонент). Вся система разбивается на различные замкнутые, автономные модули, работа над которыми может идти отдельно от других, но которые, в то же время, могут взаимодействовать с другими модулями системы.

Для этого модули должны поддерживать протоколы и интерфейсы, определяющие принципы их взаимодействия. Но так как методы, существующие в модулях, изолированы от методов других модулей, то они могут разрабатываться независимо. Таким образом, степень реализации компонент не зависит от состояния кода в других частях системы. Становится возможной параллельная работа нескольких команд над различными частями приложения или системы. Взаимодействие же между разными модулями будет происходить путем установленных протоколов и интерфейсов. Применительно к образовательным программам, примером может служить отдельная разработка заданий по техническим предметам и последующая их компоновка в общий ресурс.

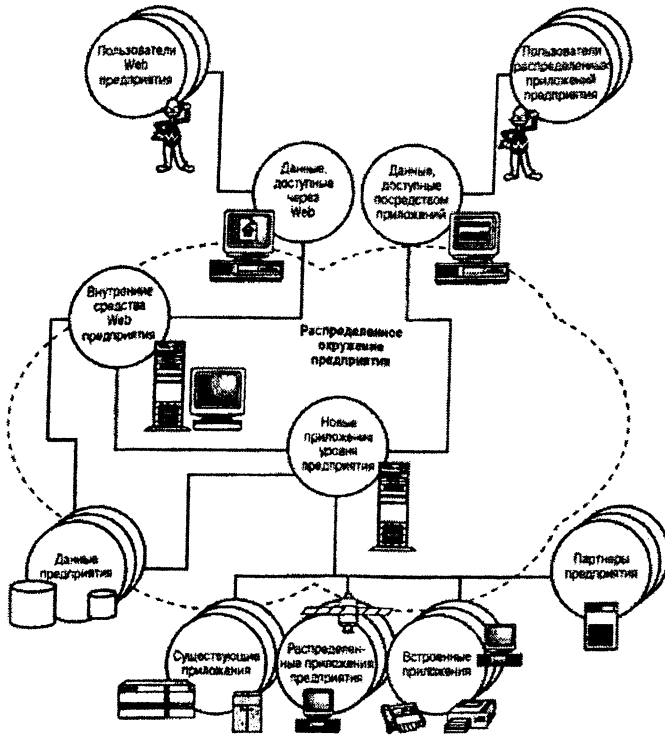


Рис.1. Модель распределенных объектов

Сопровождение приложений

В силу модульного подхода в системе, замена некой функциональной части приложения для решения возникающих проблем не требует глобальной перестройки всей системы. Наоборот, замена кода происходит только в модулях, которые на самом деле этого требуют. Во-первых, это проще, а во-вторых, значительно быстрее. Снижается также и риск возникновения ошибок при самой замене кода, ведь изменения в большей степени затрагивают внутреннюю часть объектов. Также отпадает необходимость в администрировании (на программном уровне) систем, так как преподаватели, владея первоначальными навыками обращения с текстовыми редакторами могут дополнять и изменять образовательные продукты. Помощь программистов потребуется лишь при координальных изменениях в приложении.

Тонкие клиенты

В распределенной системе имеется возможность перенести всю функциональную логику информационной системы на ее серверную часть. В этом случае приложения-клиенты, с которыми общается пользователь, могут быть сделаны небольшими и легковесными. Системные ресурсы пользователя оказываются более свободными, а вся тяжесть функциональной логики реализуется высокомоощным сервером (или сетью из серверов). При этом клиент имеет доступ к практически неограниченному числу хранилищ информации и других объектов. Появляется возможность создания легковесных компонент, пригодных для быстрой загрузки через сеть (Internet) и запуска на компьютере клиента. При этом, пользователь получает доступ к базам данных и межсетевым компонентам.

УДК 378:371.3:618.3

МЕТОДИКА РАЗРАБОТКИ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ УЧЕБНОГО КУРСА

Разоренова Т.Р.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

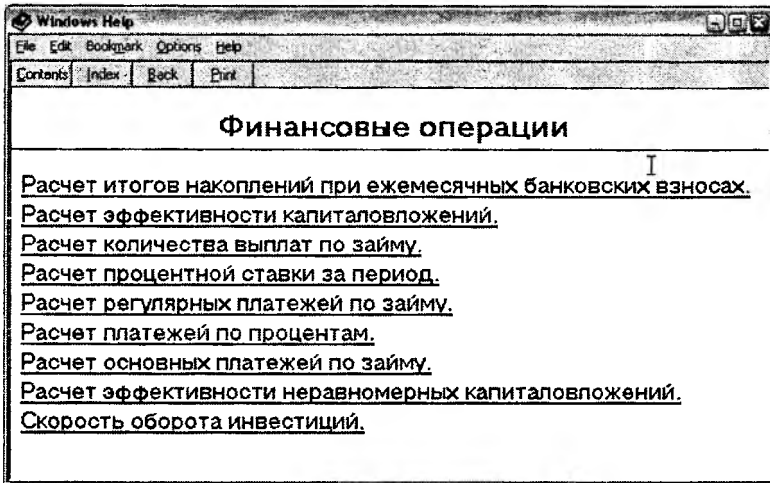
Построение современного учебного процесса по курсам, связанным с применением персональных компьютеров, естественно, должно быть основано на применении различных технологий, обеспечивающих:

- быстрое внесение изменений и дополнений в содержание методических разработок,
- безбумажную технологию,
- легкую переносимость информации (на дискетах, по сети, средствами Internet),
- обеспечение непрерывности в процессе образования.

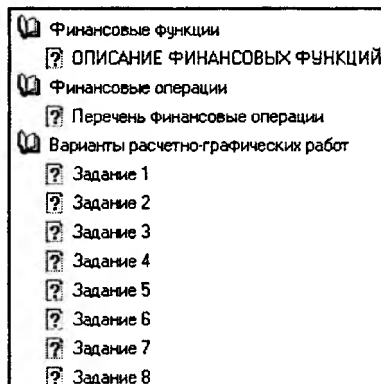
При разработке методических пособий для лабораторных практикумов, индивидуальных заданий и расчетно-графических работ, как правило, рассматриваются ряд теоретических вопросов, приводятся примеры и ссылки на дополнительную литературу, задаются требования к содержанию отчета, даются варианты заданий.

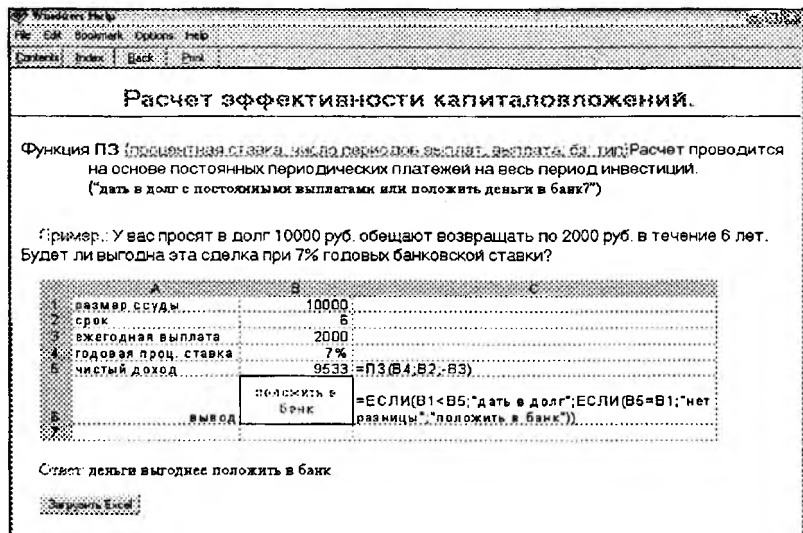
Всем этим требованиям отвечает электронный документ (файл), подготовленный специальным образом в среде WinWord и откомпилированный и

отлаженный программой Microsoft Help Workshop. Данная технология позволяет построить изложение материала в виде стандартной справочной системы, хорошо известной пользователям ПК. Разделы справочной системы выстраиваются в виде дерева с изображениями книг и документов.



Справочные системы позволяют включать кнопки для запуска макросов, с помощью которых можно выполнять демонстрации примеров, вставлять рисунки и иллюстрации, осуществлять перемещение по разделам и ключевым словам, строить предметный указатель, активизировать другие приложения.



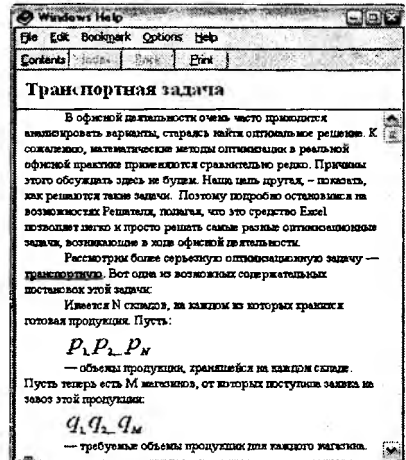
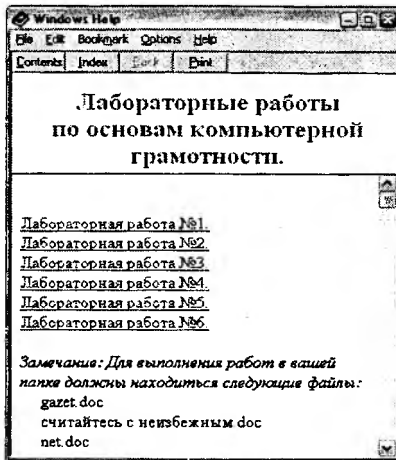
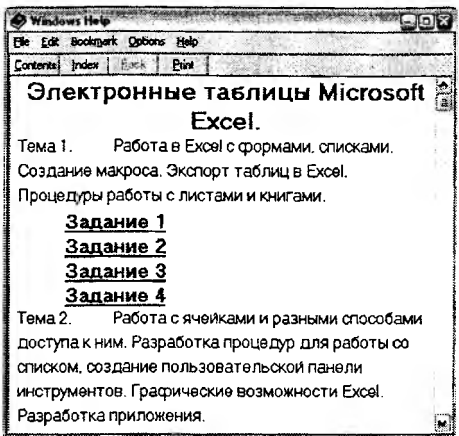
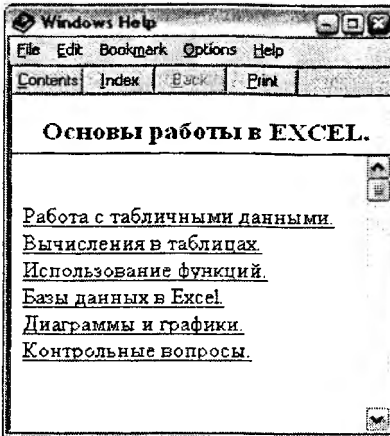


Таким образом, пользователь, загрузив документ, может:

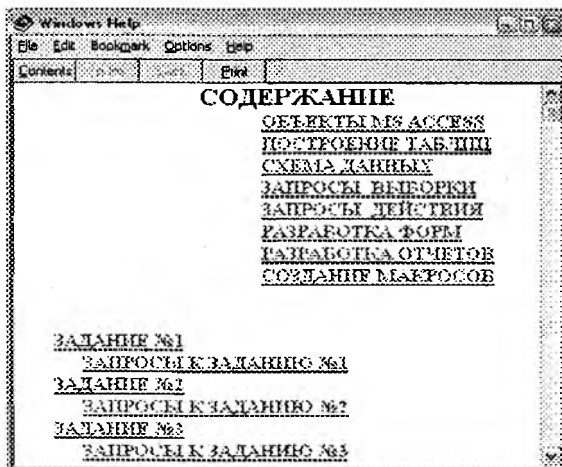
1. интерактивно запускать из него программы и демонстрационные приемы,
2. копировать информацию непосредственно из справки в разрабатываемое приложение,
3. распечатывать разделы, т.е. получать твердые копии документа.

Созданный справочный файл, имеющий расширение hlp, может существовать самостоятельно и просматриваться программой Windows WinHelp.exe или присоединяться к приложению пользователя.

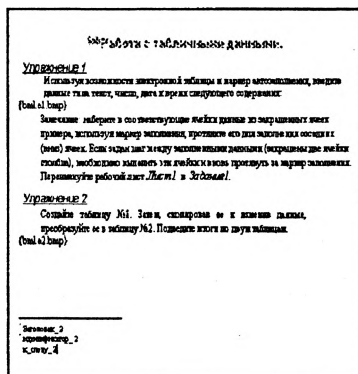
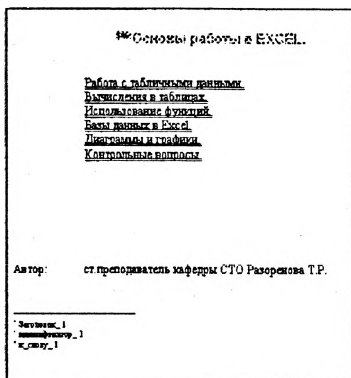
Данная технология использовалась для работы со студентами экономических специальностей и программистов. Подготовлены методические указания по выполнению РГР по использованию финансовых функций и работой с электронными таблицами в курсе «Информатика», электронная методичка с индивидуальными заданиями по курсу «Технологии организации, обработки и хранения данных», ряд лабораторных работ с заданиями по курсу «Программирование в среде MSOffice»:



Приведенные примеры демонстрируют созданные документы, разработанные по данной методике.



Подобные справки возможно создавать на основе файлов в формате HTML, а знание основ программирования на VBA позволят автоматизировать подготовку наиболее трудоемкой части — исходный документ. Ниже представлены страницы, созданные VBA-процедурой, позволяющей разбить документ на темы, создать к ним сноски, собрать оглавление с созданием скрытых ссылок на требуемые разделы.



Вопросы дизайна, удобств и сценарий остаются за автором разработки.

УДК 371.3:618.3

**РАЗРАБОТКА КЛИЕНТ-СЕРВЕРНОГО ПРИЛОЖЕНИЯ
«УЧЕБНЫЕ ПЛАНЫ СПЕЦИАЛЬНОСТЕЙ БНТУ»**

Бухвалова И.А., Житкевич А.П.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

Для полноценного участия в современной жизни необходимо владение и использование новейших информационных технологий. А именно, переход от «бумажного» делопроизводства и «электронному».

БНТУ, являясь, во-первых, крупнейшим, а, во-вторых, техническим вузом, должен определять направления развития информационных технологий для автоматизации всех аспектов производства, обучения и повседневной жизни.

Современное состояние развития компьютерной техники характеризуется созданием новых информационных технологий обработки данных. Созданы эффективные модели представления данных и знаний предметных областей, методы анализа, хранения, поиска данных и знаний. Эти модели и методы явились основой для разработки и применения баз данных, баз знаний.

Белорусский Национальный Технический Университет является крупнейшим вузом Республики Беларусь (в БНТУ 15 факультетов и 94 кафедры). Ежегодно тысячи молодых людей желают повысить свое образование в его стенах. Поэтому БНТУ необходимо удовлетворять требованиям времени, для чего нужны динамическая вариация программ, учебных планов не только в зависимости от специальности, но также от года набора студентов и формы обучения.

В связи с чем и появляется проблема систематизации учебных планов, совершенствования организации учебного процесса.

На сегодняшний день имеет место следующая модель документооборота между выпускающими кафедрами и учебно-методическим управлением: каждая выпускающая кафедра представляет учебные планы специальностей в учебно-методический отдел учебные планы специальностей, где они хранятся в виде Excel-файлов. Далее в учебно-методическом отделе эта информация анализируется и может быть предоставлена любой кафедре для изучения.

Данная модель является несовершенной и имеет некоторые недостатки. Основной проблемой является систематизация хранимых учебных планов. Сложность состоит в отсутствии определенной структуры Excel-файлов, и, как следствие этого — невозможность автоматизировать анализ учебных планов.

Разрабатываемая информационная система предлагает новую структуру организации документооборота между кафедрами и учебно-методическим отделом.

На рисунке 1 изображена диаграмма вариантов использования, иллюстрирующая концептуальную модель и основные этапы функционирования проектируемой информационной системы. Эта диаграмма «формулирует» требования к функциональному поведению разрабатываемого продукта.

Основным участником всех событий здесь является учебно-методический отдел, а именно программа-клиент, которая стоит между пользователем и информационной системой на всех этапах функционирования последней.

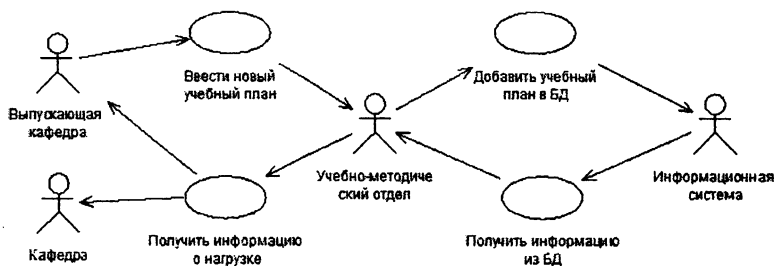


Рис.1. Диаграмма вариантов использования

Кафедры являются клиентами информационной системы. Важной функцией приложения-клиента является проверка корректности учебного плана, то есть соответствия его структуры определенному шаблону. Если структура файла удовлетворяет заданным требованиям, то происходит считывание данных с последующим занесением их в базу данных. В противном случае Excel-файл, содержащий учебный план, возвращается на предоставившую его кафедру для дальнейшей корректировки.

Следующим, и наиболее важным для конечного пользователя, этапом функционирования информационной системы является получение отчетов по различным анализируемым параметрам. Получателем готового отчета может быть как выпускающая кафедра, так и предметная кафедра.

Основой информационной системы является база данных. Всякая база данных должна представлять собой систему данных о предметной области.

Для реализации данной модели нужно спроектировать базу данных, способную удовлетворить предполагаемые запросы пользователей. Для чего было сделано следующее:

1. На основе анализа области применения были выделены документы и их реквизиты, которые подлежат хранению в БД.
2. Определены функциональные зависимости между реквизитами.
3. Были выбраны зависимые реквизиты и определены ключевые для них.

4. Реквизиты, зависящие от одного ключевого, сгруппированы.

Первый этап является определяющим при построении модели. Его исходной информацией служит содержимое хранилищ данных, определяемое входными и выходными потоками данных (рис.2).

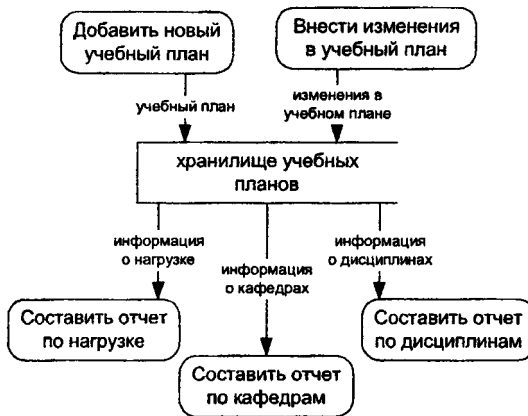


Рис.2. Определение содержимого хранилища данных.

Первоначально осуществляется анализ хранилища, включающий сравнение содержимого входных и выходных потоков и создание на основе этого сравнения варианта схемы хранилища.

Далее необходимо выделить документы, подлежащие хранению в базе данных, а также нормализовать полученные таблицы.

На следующем этапе необходимо определить отношения между сущностями. Определение отношений включает выявление связей. Для этого отношение должно быть проверено в обоих направлениях следующим образом: выбирается экземпляр одной из сущностей и определяется, сколько различных элементов другой сущности может быть с ним связано и наоборот.

На данном этапе некоторые отношения могут быть неспецифическими: многие-ко-многим. Каждое такое неспецифическое отношение преобразуется в два специфических отношения с введением новых (ассоциативных) сущностей.

На рисунке 3 изображена главная часть схемы данных, полученная на данном этапе.

Эта часть модели содержит основные элементы необходимых для хранения данных, а именно: Таблицы «Факультет» и «Кафедра» определяют

иерархическую структуру учебных подразделений. Далее следуют таблицы, которые связывают специальности и специализации с соответствующими выпускающими кафедрами и между собой.

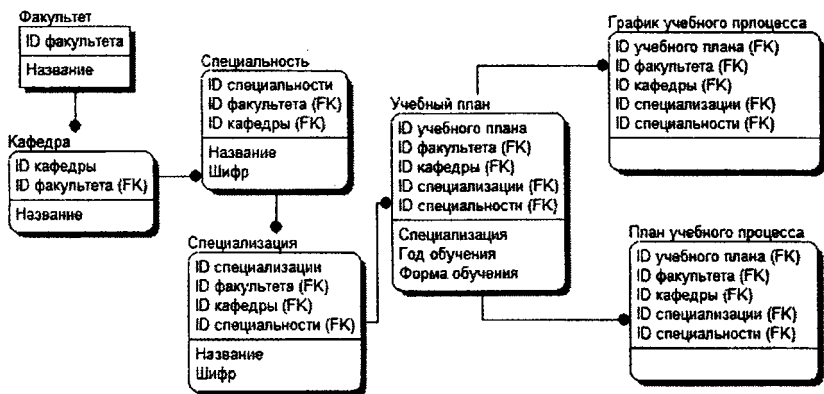


Рис. 3. Основная часть логической модели

Остальные 3 таблицы определяют учебный план и две его основные части (план и график учебного процесса). Учебный план определяется специализацией, годом набора и формы обучения.

Следующей стадией проектирования приложения является определение выходных документов. Рассмотрим подробнее основные выходные документы:

1) Основные (в стандартной форме):

- график учебного процесса;
- учебный план.

2) Дополнительные:

- дифференцированные отчеты по кафедрам, содержащие список читаемых дисциплин и распределение нагрузки по кафедрам;
- отчеты по нагрузке, разбитые по семестрам, для каждого из которых определяются список читающих кафедр, распределение часов для них и общая нагрузка.

Характерной особенностью перечисленных выше выходных документов является то, что они определяются специальностью, специализацией, годом набора и формой обучения, которые должны задаваться в приложении. Эти параметры являются входными для SQL-запроса, который на основании их значений составляет набор релевантных записей для формируемого выходного документа.

Завершающим этапом создания приложения является разработка интерфейса, где объединяются все технологии обработки данных предметной области, которые включают загрузку базы данных, ее сопровождение и решение всего комплекса задач.

Данная информационная система является серьезным нововведением в принятые стандарты документооборота. Она увеличивает производительность учебно-методического управления, а также администрации кафедр, снижая количество человеко-часов на выполнение рутинных операций, связанных с обработкой, хранением и анализом учебных планов. Преимуществом информационной системы является ее расширяемость, то есть возможность подключения в дальнейшем новых модулей для обработки данных для иных направлений. Еще одним достоинством системы является то, что она основана на СУБД SQL Server, являющейся одной из наиболее эффективных и надежных в своем классе.

УДК 621.165:621.311

**ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ТЭЦ В СЛУЧАЕ
ПРИМЕНЕНИЯ ТЕПЛОФИКАЦИОННЫХ ТУРБИН
С ПРОТИВОДАВЛЕНИЕМ**

Горбачев М.В., Попова Ю.Б., Пащенко А.В.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

В данной работе представлен один из способов повышения эффективности использования природных топливных ресурсов. Речь идет об оптимизации режимов работы ТЭЦ. Состоящая из нескольких теплофикационных турбин тепловая электрическая централь в общем случае распределяет суммарные производственную, теплофикационную и электрическую нагрузки между турбинами. Для каждого набора суммарных нагрузок существует множество допустимых распределений (режимов работы ТЭЦ). Среди этих распределений существует такое, которое обеспечивает минимум топливно-энергетических затрат ТЭЦ. Задача оптимизации режима работы ТЭЦ состоит в том, чтобы найти оптимальное распределение суммарных нагрузок станции между ее турбинами. Решение данной задачи позволит более эффективно использовать имеющиеся топливно-энергетические ресурсы республики.

Каждая теплофикационная турбина ТЭЦ с двумя регулируемыми отборами обладает семейством расходных характеристик, в том числе невыпуклых и негладких. Расходная характеристика представляет собой функцию, описывающую расход теплоты (или топлива) данной турбиной, в зависимости от трех переменных — производственной, теплофикационной и электрической нагрузок. Решение задачи оптимизации режима работы станции требует одновременного и взаимосвязанного распределения производственной, теплофикационной и электрической нагрузок. Это делает методы относительных приростов и градиентный неэффективными для решения задачи. Метод относительных приростов может быть использован для распределения нагрузки, если расходные характеристики турбин являются непрерывными и обращены выпуклостью вниз (т. е. при росте нагрузки наклон характеристики возрастает). Это условие не всегда выполняется, поскольку в некоторых случаях на характеристиках имеются падающие участки, что соответствует уменьшению наклона расходной характеристики с ростом нагрузки. Метод трехмерного динамического программирования позволяет решить данную задачу [1].

Метод динамического программирования [2, 3]. от простого перебора отличается использованием некоторых приемов, повышающих эффективность отыскания решения:

- для получения частного значения решения вначале отыскивается общая зависимость решения от исходных данных, тогда определяется и требуемое решение для заданных исходных данных;
- процесс поиска решения разбивается на ряд этапов, содержанием каждого из которых является перебор возможных решений, причем на последующих этапах используются результаты предыдущих;
- для уменьшения количества перебираемых решений выбирается заданный шаг изменения переменных величин, каждая из которых может при этом принимать только ограниченное число значений.

Метод разделен на прямой и обратный ходы. При прямом ходе динамического программирования суммарная нагрузка ТЭЦ некоторым образом распределяется между ее турбинами, и для заданного распределения находится функция Беллмана. Для единственной работающей турбины функция Беллмана — это расходная характеристика данной турбины. Для нескольких турбин функция Беллмана равна суммарному расходу теплоты при условии, что суммарная нагрузка между турбинами распределена оптимально. Сначала нагружается одна турбина, затем две, и так далее (до максимального числа одновременно работающих турбин). Возможна ситуация, когда экономичнее использовать не все рассматриваемые турбины, поэтому при каждом добав-

лении турбины в расчет учитывается возможность отсутствия нагрузок на ней. При включении в работу каждой следующей турбины используется найденное на предыдущем шаге оптимальное распределение суммарных нагрузок. Здесь возможны различные варианты реализации метода (например, реализация с хранением промежуточных данных на внешнем носителе, рекурсивная реализация). После завершения прямого хода динамического программирования известны функция Беллмана для всех работающих турбин и оптимальные производственная, теплофикационная и электрическая нагрузки последней вступившей в расчет турбины.

При обратном ходе динамического программирования из полученных ранее (в прямом ходе метода) значений определяются нагрузки на каждую из турбин ТЭЦ. Для этого вновь находится функция Беллмана, но уже для меньшего числа турбин и с учетом той части суммарной нагрузки станции, которая приходится на уже «оптимизированную» турбину. Соответствующие оптимальному режиму нагрузки последней вступившей в расчет турбины определены в прямом ходе метода. Работа метода заканчивается, когда будут найдены оптимальные нагрузки каждой из турбин.

Задача оптимизации режима работы ТЭЦ в случае применения турбин с противодавлением накладывает дополнительные ограничения на условия оптимального режима. Особенностью теплофикационных турбин с противодавлением является тот факт, что мощность, развиваемая турбиной, целиком определяется нагрузкой тепловых потребителей [4]. Тогда методика распределения нагрузок на ТЭЦ, в составе которых имеются турбины с противодавлением, для режимов работы по тепловому графику будет полностью совпадать с описанной в [5].

При работе ТЭЦ по электрическому графику параллельно с турбиной с противодавлением должны быть включены конденсационные или турбины с регулируемыми отборами, которые воспринимают изменения электрической нагрузки. В данном случае методика оптимизации будет несколько отличаться от рассмотренной выше. Главное отличие заключается в том, что при решении задачи методом динамического программирования турбину с противодавлением необходимо нагружать в первую очередь (т. е. $i=m$). Такой подход позволит для суммарных тепловых нагрузок X^m и Y^m перебирать возможные варианты нагрузок Q_{pm} и Q_{tm} турбины с противодавлением и определять соответствующую им электрическую нагрузку $N_m(Q_{pm}, Q_{tm})$. Тогда остальные $m-1$ турбины будут распределять между собой нагрузки, равные разности суммарных и вырабатываемых турбиной с противодавлением, т. е. $X^m - Q_{pm}$, $Y^m - Q_{tm}$; $Z^m - N_m(Q_{pm}, Q_{tm})$.

Если же в составе ТЭЦ имеется s турбин с противодавлением (1 J s J m-1), то они также должны вводиться в рассмотрение в первую очередь по одной до распределения нагрузок между $m-s$ агрегатами. Такое разделение позволит сочетать двумерное динамическое программирование для турбин с противодавлением с трехмерным для остальных. Поэтому функция Беллмана для s турбин с противодавлением запишется в виде:

$$Bel^i(X^i, Y^i) = \max_{Q_{ni}, Q_{\tau i}} [F_i(Q_{ni}, Q_{\tau i}) + Bel^{i-1}(X^i - Q_{ni}, Y^i - Q_{\tau i})], \quad (1)$$

где $i \in [m-s+1; m]$.

Функция Беллмана (1) справедлива при следующих ограничениях:

$$X^i \in [0; \min(\sum_{\tau=1}^i Q_{n\tau}^{\max}, Q_{n\Sigma})], \quad (2)$$

при фиксированном X^i из (2)

$$Y^i \in [0; \min(\sum_{\tau=1}^i Q_{\tau\tau}^{\max}, Q_{\tau\Sigma})], \quad (3)$$

при фиксированных X^i, Y^i из (2), (3)

$$Q_{ni} \in [0, \min(Q_{ni}^{\max}, X^i)], \quad (4)$$

при фиксированных X^i, Y^i, Q_{ni} из (2), (3), (4)

$$Q_{\tau i} \in [Q_{\tau i}^{\min}, \min(Q_{\tau i}^{\max}, Y^i)], \quad (5)$$

Функция Беллмана для $m-s$ турбин запишется в виде:

$$Bel^i(X^i, Y^i, Z^i) = \max_{Q_{ni}, Q_{\tau i}, N_i} [F_i(Q_{ni}, Q_{\tau i}, N_i) + Bel^{i-1}(X^i - Q_{ni}, Y^i - Q_{\tau i}, Z^i - N_i)], \quad (6)$$

где $X^i \in [0; \min(\sum_{\tau=1}^i Q_{n\tau}^{\max}, Q_{n\Sigma})], \quad (7)$

при фиксированном X^i из (7)

$$Y^i \in [0; \min(\sum_{\tau=1}^i Q_{\tau\tau}^{\max}, Q_{\tau\Sigma})], \quad (8)$$

при фиксированных X^i, Y^i из (7), (8)

$$Z^i \in \begin{cases} 0, \text{ если } X^i = 0 \text{ и } Y^i = 0; \\ \left[\min_{1 \leq \tau \leq i} (N_{\tau}^{\min}(X^i, Y^i)); \min \left(\sum_{\tau=1}^i N_{\tau}^{\max}(X^i, Y^i), N_{\Sigma} \right) \right], \end{cases} (9)$$

при фиксированных X^i, Y^i, Z^i из (7), (8), (9)

$$Q_{ni} \in [0; \min(Q_{ni}^{\max}, X^i)], \quad (11)$$

при фиксированных X^i, Y^i, Z^i, Q_{ni} из (8), (9), (10), (11)

$$Q_{\tau i} \in [0; \min(Q_{\tau i}^{\max}, Y^i)], \quad (12)$$

при фиксированных $X^i, Y^i, Z^i, Q_{ni}, Q_{\tau i}$ из (8), (9), (10), (11), (12)

$$N_i(Q_{ni}, Q_{\tau i}) \in \begin{cases} 0, \text{ если } (Z^i < N_i^{\min}) \text{ или } (Q_{ni} = 0, Q_{\tau i} = 0); \\ \left[N_i^{\min}(Q_{ni}, Q_{\tau i}); \min(N_i^{\max}(Q_{ni}, Q_{\tau i}), Z^i) \right]. \end{cases} (13)$$

Необходимо добавить, что рассматриваемый случай распределения нагрузок между агрегатами целесообразно проводить через рекурсивную реализацию метода динамического программирования. Это связано с тем, что шаг оптимизации не всегда может обеспечить совпадение разности $Z^m - N_m(Q_{nm}, Q_{tm})$ с предварительно рассчитанными оптимальными значениями функции Беллмана для $m-l$ турбин.

Описанный выше метод решения задачи оптимизации режимов работы ТЭЦ реализован на языке программирования C++. При решении задачи использована рекурсивная реализация метода динамического программирования. Это позволило существенно ускорить работу метода по сравнению с реализацией, использующей хранящиеся на внешнем носителе данные.

Для практического применения реализации метода создано программное обеспечение — прикладная программа, работающая в среде Win32. Взаимодействие с пользователем реализовано в форме диалога, наглядно представляющего параметры и процесс расчета. Пользователь может задавать участвующие в расчете турбины, давления производственного и теплофикационного отборов, критерий оптимизации (минимум расхода теплоты или максимум экономии теплоты против варианта раздельного производства электроэнергии и теплоты), производственную, теплофикационную и электрическую нагрузки (интервалы нагрузок), шаги расчета. Результат расчета отображается на листе Microsoft Excel (предполагается, что он установлен на машине пользователя),

что позволяет далее обрабатывать полученные данные. Приложение написано и отлажено в Microsoft Visual C++ 6.0 с использованием библиотек Microsoft Foundation Classes. Тестирование показало, что приложение достаточно быстро и эффективно решает поставленную задачу. При тестировании использовались аналитические расходные характеристики турбоагрегатов первой очереди Минской ТЭЦ-3, полученные по методике [6].

Предварительные оценки показывают, что оптимизация позволит повысить эффективность работы ТЭЦ на 2–4%. При этом следует учесть, что по абсолютной величине эти 2–4% составят десятки тонн сэкономленного топлива, поскольку речь идет об электростанции.

Литература

1. Попова Ю. Б. Математическое и программное обеспечение для оптимизации режима ТЭЦ // Известия вузов и энергетических объединений СНГ. – 2000. – № 6. – С. 79 – 87.
2. Беллман Р. Динамическое программирование. М.: изд-во иностр. литературы. – 1960. – 400 с.
3. Беллман Р., Дрейфус С. Прикладные задачи динамического программирования. – М.: Наука, 1965. – 457 с.
4. Щегляев А. В. Паровые турбины (теория теплового процесса и конструкции турбин). – М.: Энергия, 1976. – 368 с.
5. Пашенко А. В., Попова Ю. Б., Горбачев М. В. Программное обеспечение для оптимизации режима работы теплофикационных турбин по тепловому графику // Вестник БГПА. – 2002. – № 3. – С. 68–70.
6. Качан А. Д., Попова Ю. Б., Пашенко А. В. Построение аналитических моделей нормативных энергетических характеристик теплофикационных турбин // Известия вузов и энергетических объединений СНГ. Энергетика. – 2002. – № 5. – С. 84–93.

УДК 629.1.02

К ВОПРОСУ ПОСТРОЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ КОЛЕБАНИЙ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

Гурский Н.Н., Фурунжиев Р.И.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

1. Введение

Поведение динамических объектов, расчетные колебательные модели которых представляются в виде системы дискретных масс с упруго-диссипативными связями, описывается, как правило, системой обыкновенных нелинейных дифференциальных уравнений второго порядка. Число уравнений зависит от степени детализации расчетной схемы. В общем случае модель состоит из конечного числа сосредоточенных масс. В данной статье рассматриваются принципы построения информационных моделей, устанавливающих однозначную связь элементов расчетной схемы объекта и математической модели в форме дифференциальных уравнений.

2. Особенности алгоритмов учета фазовых координат и принципы построения информационных моделей транспортных средств

Многие численные методы, используемые для решения упомянутых систем уравнений, например, метод Рунге-Кутты, как правило, требуют предварительного понижения порядка путем замены переменных и приведения системы к нормальной форме Коши:

$$\frac{dx_i}{dt} = F_i(x_1, x_2, \dots, x_n, a_1, a_2, \dots, a_n, q_1, q_2, \dots, q_n, t), \quad i = 1, 2, \dots, n,$$

с начальными условиями: $t = t_0 : x_i(t_0) = x_{0i}$, или в векторно-матричной форме

$$\dot{X} = F(X, A, Q, t), \quad (1)$$

с начальными условиями: $X(t_0) = X_0$, где $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ – вектор обобщенных координат;

$\dot{X} = \left(\frac{dx_1}{dt}, \frac{dx_2}{dt}, \dots, \frac{dx_n}{dt} \right)$ – вектор обобщенных скоростей;

$A = (a_1, a_2, \dots, a_n)$ – вектор параметров системы; $Q = (q_1, q_2, \dots, q_n)$ – вектор

случайных функций времени, моделирующих воздействия на систему;

$X_0 = (x_{01}, x_{02}, \dots, x_{0n})$ – вектор начальных условий; $F = (f_1, f_2, \dots, f_n)$ – вектор-функция нелинейных правых частей.

Алгоритм метода Рунге-Кутты требует резервирования непрерывных массивов, в которых располагаются значения искоемых фазовых координат (вектор X) и их производных (вектор). В простейшем случае при составлении системы уравнений используется глобальная нумерация степеней свободы (перемещений, углов и их скоростей), никак не связанная с каждой конкретной массой.

Информационная модель для расчетной схемы (фиг.1) многоопорной машины, поддерживающая такой подход, приведена на фиг.2. Номера расположенные рядом со стрелками, являются индексными обозначениями фазовых координат, являющихся компонентами вектора X . Производные фазовых координат имеют четную нумерацию и на фиг.2 не показаны. Как видно, каждая масса обладает заданным числом степеней свободы. Нумерация фазовых переменных, в общем случае, может производиться в любом порядке, либо может начинаться с любой сосредоточенной массы.

Основное достоинство такого подхода состоит в формировании полностью заполненного непрерывного массива. Недостатком его является то, что при введении или удалении дополнительных фазовых координат необходимо изменять полученную нумерацию уравнений, а, следовательно, и переформировывать массив, в котором хранится вектор X .

Изложенный ниже алгоритм нумерации фазовых координат более динамичный и позволяет исключить указанный недостаток.

При этом, чтобы однозначно идентифицировать каждую сосредоточенную массу, ей присваивается номер из множества возрастающей последовательности чисел, начиная с единицы.

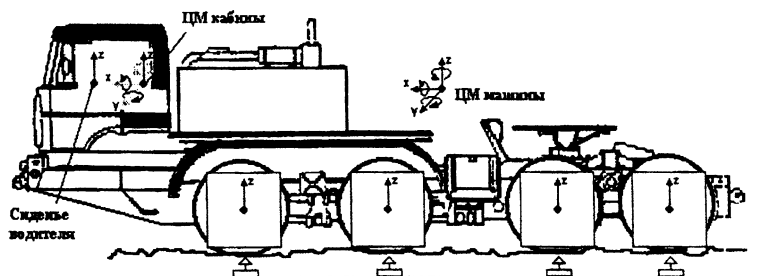


Рис.1. Расчетная схема многоопорной машины

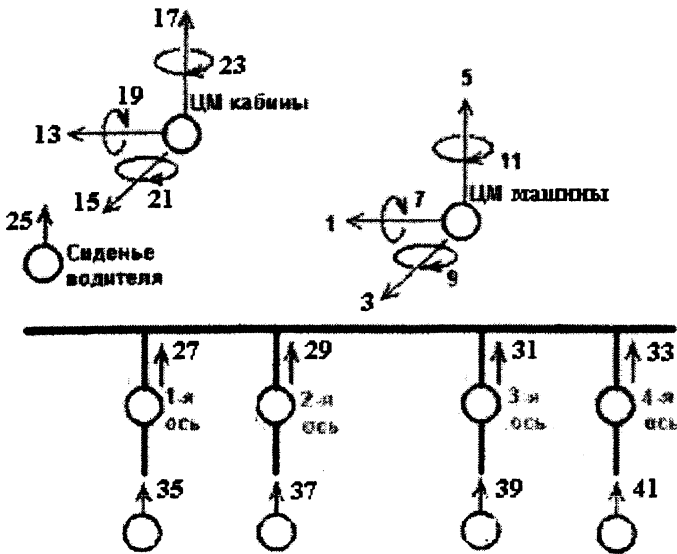


Рис. 2. Информационная модель многоопорной машины

Для определения ее местоположения в массиве используется принцип индексации, позволяющий располагать составляющие фазовые координаты данной массы в произвольном месте массива. Значение индекса, как правило, функционально связано с номером массы.

Таким образом, индекс однозначно определяет начало расположения локальных степеней свободы рассматриваемой массы в глобальном массиве. Локальная нумерация позволяет формализовать обозначения фазовых координат в пределах каждой массы, при этом предполагается наличие полного списка локальных номеров, который может быть и избыточным.

Такой подход позволяет управлять расположением в зарезервированном массиве локальных степеней свободы, относящихся к заданной массе, и при этом нет необходимости перенумерации уравнений описывающих данные фазовые координаты. Рассмотренный принцип может быть положен в основу построения обобщенной пространственной информационной модели транспортных средств.

1. Обобщенная информационная модель транспортного средства

Изложенные выше принципы, покажем на примере многоопорного тягача с полуприцепом. Полученную при этом информационную модель, называемую в дальнейшем обобщенной (включающей основные узлы и агрегаты), можно использовать и для других транспортных объектов. На основа-

нии расчетной схемы многоопорного тягача с многоопорным полуприцепом получим информационную модель, показанную на рис.3.

Как видно, в этой модели идентифицированы сосредоточенные массы и при этом каждая из них обладает заданным числом локальных степеней свободы, имеющих фиксированные номера. Чтобы определить расположение составляющих фазовых координат каждой массы в глобальном информационном массиве, достаточно задать индексные константы для каждой массы (на фиг.3 обозначено, например, смТ, смР и т.д.). Так как в пределах каждой узловой точки (сосредоточенной массы) введена локальная нумерация координат, система уравнений (1), описывающая выходные фазовые переменные, однозначно определяется такой нумерацией с учетом индексных смещений. Если необходимо произвести операции по удалению или добавлению каких-либо степеней свободы, не требуется переписывать глобальную нумерацию фазовых переменных, достаточно описать нелинейную функцию в рамках данного локального узла.

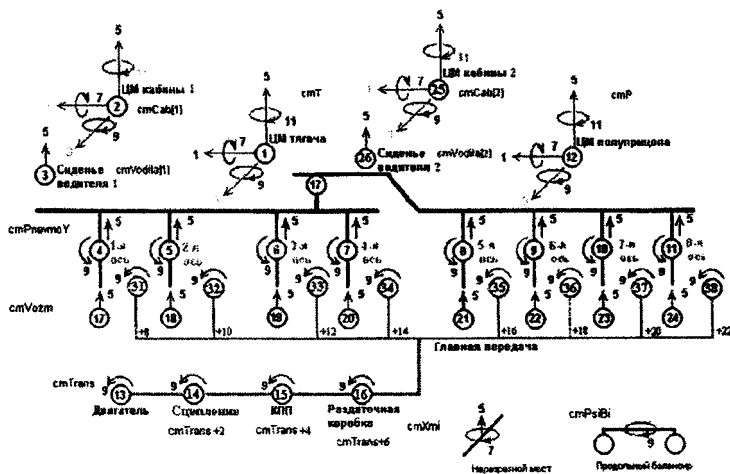


Рис.3. Обобщенная информационная модель транспортного средства

Представленная информационная модель, наряду с элементами поддрессирования тягача и полуприцепа, включает узлы силовой схемы трансмиссии, а также элементы вторичного поддрессирования (кабины, сиденья водителя).

Заключение

Рассмотренные информационные модели позволяют построить программную реализацию формирования системы уравнений для анализа коле-

баний как отдельных узлов, так и всего транспортного средства в целом. Предложенный принцип локализации фазовых координат в пределах каждой сосредоточенной массы, в данной статье, является очередным шагом перехода от данной информационной модели к объектно-ориентированной технологии моделирования колебаний подвижных наземных объектов.

УДК 621.3

МАСШТАБИРУЕМОСТЬ РЕШЕНИЙ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ СИСТЕМЫ «GALAKTIKA»

Лакин В.И., Хенейни А.Х., Бабарика М.М., Чигирь Ю.И.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

Система «Galaktika» — это коммерческая комплексная информационная система, обеспечивающая комплексный подход к управлению предприятием (организацией). Она объединяет в себе средства управления материальными, финансовыми, кадровыми, информационными ресурсами, а также методику внедрения предлагаемого решения.

Под масштабируемостью принято понимать возможность использования программного продукта в вычислительных сетях различного размера: в масштабе отдельного подразделения, предприятия, корпорации. Применительно к системе «Galaktika» возможность обслуживания значительно различающихся групп пользователей определяется по двум направлениям, обеспечивая масштабируемость в квадрате.

Первым направлением масштабируемости является широкий выбор применяемых СУБД. Btrieve, MS SQL, Oracle в текущей версии и Sybase, Informix, DB2 в перспективных позволяют покрыть практически любые запросы по автоматизации.

Вторым направлением масштабируемости является возможность выбора аппаратной и программной платформы сервера БД. Intel с Windows NT Server, NetWare, Solaris, HP с HP/UX, AIX, Sun с Solaris, SCO UnixWare, DEC Alpha с NTWorkgroup Server, AS/400 с OC/400 — это лишь небольшой перечень возможных конфигураций. К сожалению, невозможно дать однозначные рекомендации по выбору наиболее подходящего варианта, даже опираясь на оценки стоимость/производительность, так как помимо этого существует множество других, порой более важных факторов.

Выбирая ту или иную БД, аппаратную и программную конфигурацию можно порекомендовать следующие критерии:

- количество одновременно работающих пользователей в сети;
- состав существующего парка вычислительной техники и архитектуры вычислительной сети;
- характер и структура подразделений предприятия (организации) и информационные потоки между ними;
- необходимая степень надежности системы. Примерную зависимость между аппаратно-программной платформой сервера и его производительностью при обслуживании клиентов «Galaktika» можно проиллюстрировать графиком, представленным на рис. 1.

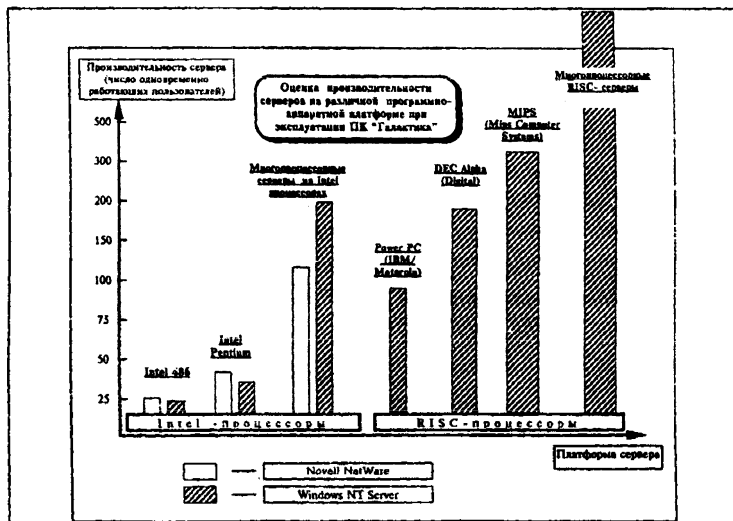


Рис. 1. Зависимость между аппаратно-программной платформой сервера и его производительностью при обслуживании клиентов «Galaktika»

При росте числа пользователей «Galaktika» все большую роль начинает играть архитектура построения вычислительной сети, так как узким местом может стать пропускная способность самой сети. Обычно для прокладки сети используется коаксиальный кабель со скоростью передачи данных в 10 МВ/сек. При более 50-ти интенсивно работающих пользователях такая пропускная

способность может увеличивать время реакции системы на запрос. Разрешить данную проблему можно с помощью сетевого коммутатора, соединяемого с сервером кабелем витая пара или оптоволоконным кабелем.

Один из возможных вариантов построения вычислительной сети для торгового предприятия выглядит следующим образом (см. рис. 2):

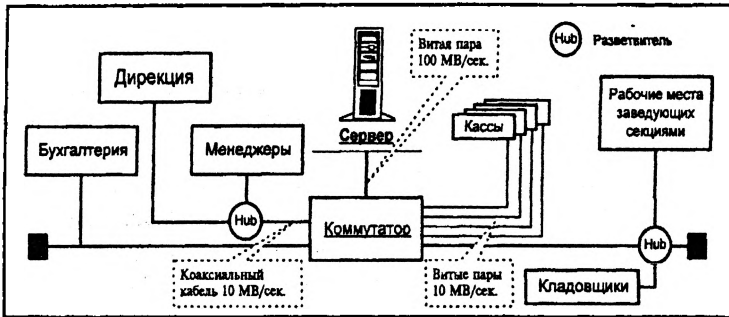


Рис. 2. Пример построения сети

Для доступа к базам данных в формате Btrieve, MS SQL сервера, Oracle, из других программных продуктов имеется две принципиальных возможности:

- экспорт-импорт данных;
- прямой доступ через драйверы ODBC.

Поставляемая в составе «Galaktika» утилита SQLImex обеспечивает экспорт-импорт данных через формат .DBF и .TXT.

Продукты других фирм представляют более развитые возможности для организации взаимодействия. Так, например, фирмы Pervasive Software (бывшая Btrieve Technologies Inc.), Microsoft Corp., Intersolv поставляют наборы ODBC драйверов, обеспечивающих взаимный обмен информацией между Btrieve, MS SQL, Oracle и такими языками и СУБД, как Microsoft Visual Basic, Visual C/C++, PowerBuilder, Access, FoxPro, Paradox, dBase, Excel, Lotus.

Родной интерфейс для Btrieve можно использовать с языками C/C++, Pascal, однако его применение трудоемко. MS SQL сервер своим естественным интерфейсом считает ODBC драйвер. Что касается Oracle, то список программных продуктов, имеющих прямой доступ к Oracle, займет немало места. Выделим лишь некоторые из них: Delphi, PowerBuilder, S-Designer, WinWin, Crystal Reports, не говоря уже о языках программирования.

Пользователям «Galaktika», желающим обрабатывать накапливаемую в базе данных информацию собственными программными средствами, предо-

ставляется полное описание структуры базы данных и рекомендации по технологии организации обмена.

УДК 621.1.0.18

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ СТАБИЛИЗАЦИИ НАГРЕВА МЕТАЛЛА

Ковалевский В.Б., Зенин В.Н.

Белорусский национальный технический университет

Минск, Беларусь

Вопросы экономической эффективности, а именно выбора оптимальных технологических режимов по заданным критериям, являются одними из важнейших при изучении работы любых промышленных устройств. Однако, особенно остро эта проблема поставлена в области энергосбережения.

Задача аналитического конструирования оптимальных регуляторов (АКОР) рассматривалась многочисленными исследователями (например [1], [2]). Основные идеи ее решения связаны с принципом максимума Л.С. Понтрягина (задача сводится к соответствующей краевой), с динамически программированием (задача сводится к решению специально построенного уравнения Беллмана) и с построением функции Кротова. Во всех этих случаях приходится интегрировать систему нелинейных уравнений Рикатти.

Предлагаемый подход решения задачи основан на построении специальной функции Кротова, которую можно получить в квадратурах. При этом для ее построения приходится интегрировать систему стационарных линейных дифференциальных уравнений и одно нелинейное дифференциальное уравнение. Таким образом, отпадает необходимость решения нелинейного уравнения Беллмана, что позволяет построить более эффективный алгоритм решения задачи аналитического конструирования оптимальных регуляторов [3].

Имеется вполне управляемая стационарная линейная система

$$\frac{dx}{dt} = Ax + Bu, \quad (1)$$

$$x(t_k) = x_T, \quad (2)$$

где x — вектор-столбец размерности $n \times 1$; u — вектор-столбец управления размерности $m \times 1$; A — матрица размерности $n \times n$; B — матрица размерности $n \times m$; t_k — фиксированное конечное время $t_k > 0$; x_T — вектор фазовых координат в момент времени t_k .

Требуется найти такое гладкое управление $u(t)$, которое переводило бы решение системы (1) в конечное состояние (2) за время t_k и доставляло бы минимум функционалу

$$I^*(u) = \int_0^{t_k} ((a, x) + (b, u) + x^T P x + u^T Q u) dt \rightarrow \min_{u \in R^m}, \quad (3)$$

где P — матрица размерности $n \times n$; Q — положительно определенная, симметричная матрица размерности $m \times m$.

Для решения полученной задачи рассматривается вспомогательное квазилинейное ДУ в частных производных [5]

$$\frac{\partial S(x, t)}{\partial t} + \left(\frac{\partial S(x, t)}{\partial x}, Ax + Bu \right) = (a, x) + (b, u) + x^T P x + u^T Q u, \quad (4)$$

$$\text{с начальным условием } S(x, 0) = 0, \quad (5)$$

Определим из (4) точку экстремума, при котором производится решение системы (4), (5):

$$u = \frac{1}{2} (Q^{-1})^T B^T \left(\frac{\partial S(x, t)}{\partial x} \right)^T - \frac{1}{2} (Q^{-1})^T b^T, \quad (6)$$

После подстановки (6) в (4) получается

$$\begin{aligned} & \frac{\partial S(x, t)}{\partial t} + \left(\frac{\partial S(x, t)}{\partial x}, Ax + \frac{1}{2} \left(W \left(\frac{\partial S(x, t)}{\partial x} \right)^T - V \right) \right) = \\ & (a, x) + \frac{1}{2} \left(b, (Q^{-1})^T B^T \left(\frac{\partial S(x, t)}{\partial x} \right)^T - (Q^{-1})^T b^T \right) + x^T P x + \\ & + \frac{1}{4} \left(\frac{\partial S(x, t)}{\partial x}, W \left(\frac{\partial S(x, t)}{\partial x} \right)^T - b (Q^{-1})^T B^T \left(\frac{\partial S(x, t)}{\partial x} \right)^T - \right. \\ & \left. - \frac{\partial S(x, t)}{\partial x} V + b (Q^{-1})^T b^T \right), \end{aligned} \quad (7)$$

$$\text{где } W = B (Q^{-1})^T B^T, \quad V = B (Q^{-1})^T b^T.$$

Таким образом, имеется задача Коши для нелинейного уравнения с частными производными первого порядка (7), (5). Данная задача решается методом характеристик [4].

Введем обозначения $R = \frac{\partial S}{\partial x}$, $R_0 = \frac{\partial S}{\partial t}$ и построим характеристическую систему уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dt}{dv} = 1, \\ \frac{dx}{dv} = Ax + \frac{1}{2}WR^T - \frac{1}{2}V \\ \frac{dR_0}{dv} = 0 \\ \frac{dR}{dv} = -RA - a - x^T(P + P^T) \\ \frac{dS}{dv} = R_0 + RAx + \frac{1}{2}RWR^T - \frac{1}{2}RV \end{cases} \quad (8)$$

с начальными условиями

$$\begin{cases} t|_{v=0} = 0, \\ x|_{v=0} = \tau, \\ R_0|_{v=0} = (a, \tau) + \tau^T P \tau, \\ R|_{v=0} = (0, \dots, 0), \\ S|_{v=0} = 0, \end{cases} \quad (9)$$

Из анализа систем уравнений (8), (9) следует, что $t=v$ и $R_0 = (a, \tau) + \tau^T P \tau$.

На основании системы уравнений (8) составляется уравнение

$$\begin{pmatrix} \frac{dx}{dv} \\ \left(\frac{dR}{dv}\right)^T \end{pmatrix} = \Delta(t) \begin{pmatrix} x \\ R^T \end{pmatrix} + f(t), \quad (10)$$

Получено неоднородное нестационарное уравнение вида $\dot{x} = \Delta(t)x + f(t)$ с начальным условием $x(0) = x_0$. Для данного уравнения решение записывается в виде

$$\begin{pmatrix} x \\ R^T \end{pmatrix} = \Phi(v) \begin{pmatrix} \tau \\ 0 \end{pmatrix} + L(v), \quad (11)$$

где $\Phi(v)$ — фундаментальная матрица размерности $2n \times 2n$;

$$L(v) = \Phi(v) \int_0^v \Phi^{-1}(\xi) f(\xi) d\xi$$

или
$$\begin{pmatrix} x \\ R^T \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \varphi_1(v) & \varphi_3(v) \\ \varphi_2(v) & \varphi_4(v) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ \tau \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} l_1(v) \\ l_2(v) \end{pmatrix}, \quad (12)$$

Из (12) следует

$$x = \varphi_1(v)\tau + l_1(v), \quad (13)$$

$$R^T = \varphi_2(v)\tau + l_2(v), \quad (14)$$

Вектор τ определяется как

$$\tau = \varphi_1(v)^{-1} x - \varphi_1(v)^{-1} l_1(v), \quad (15)$$

После подстановки выражений (13), (14) в формулу — из системы $\frac{dS}{dv}$

(И) последняя имеет вид

$$\begin{aligned} \frac{dS(\tau, v)}{dv} &= (a, \tau) + \tau^T P \tau + (\tau^T \varphi_2(v)^T + l_2(v)^T) \times \\ &\times \left[A(\varphi_1(v)\tau + l_1(v)) + \frac{1}{2} W(\varphi_2(v)\tau + l_2(v)) - \frac{1}{2} V \right]. \end{aligned} \quad (16)$$

Отсюда, интегрирую, можно получить выражение для $dS(\tau, t)$. После подстановки в него выражения (15), дифференцирования выражения по x и транспонирования имеется выражение, которое можно подставить в (6) получим выражение для u :

$$\begin{aligned} u &= -\frac{1}{2}(Q^{-1})^T b^T + \frac{1}{2}(Q^{-1})^T B^T \left[(\varphi_1(t)^{-1})^T a^T t + 2(\varphi_1(t)^{-1})^T \times \right. \\ &\times P(\varphi_1(t)^{-1} x - \varphi_1(t)^{-1} l_1(t)) t + (\varphi_1(t)^{-1})^T \int_0^t \varphi_2(v)^T A l_1(v) dv + \\ &+ (\varphi_1(t)^{-1})^T \left(\int_0^t \varphi_2(v)^T A \varphi_1(v) dv + \left(\int_0^t \varphi_2(v)^T A \varphi_1(v) dv \right)^T \right) \times \\ &\times (\varphi_1(t)^{-1} x - \varphi_1(t)^{-1} l_1(t)) + \frac{1}{2} (\varphi_1(t)^{-1})^T \int_0^t \varphi_2(v)^T W l_2(v) dv - \\ &\left. \frac{1}{2} (\varphi_1(t)^{-1})^T \left(\int_0^t \varphi_2(v)^T W \varphi_2(v) dv + \left(\int_0^t \varphi_2(v)^T W \varphi_2(v) dv \right)^T \right) \times \right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \times (\varphi_1(t)^{-1} x - \varphi_1(t)^{-1} l_1(t)) + \frac{1}{2} (\varphi_1(t)^{-1})^T \int_0^t \varphi_2(v)^T dv \\ & + (\varphi_1(t)^{-1})^T \left[\left(\int_0^t l_2(v)^T A \varphi_1(v) dv \right)^T + \frac{1}{2} \left(\int_0^t l_2(v)^T W \varphi_2(v) dv \right)^T \right]. \end{aligned}$$

Затем это выражение подставляем в исходную систему (1). Это позволяет получить уравнение вида

$$\frac{dx}{dt} = N(t)x + M(t), \quad (17)$$

Решение уравнения (17) с начальным условием (2) является искомой оптимальной траекторией $x^*(t)$.

Постановка $x^*(t)$ позволяет получить оптимальное управление $u^*(t)$.

Для численного решения описанной задачи было разработано программное обеспечение.

Литература:

1. Кротов В.Ф., Гурман В.И. Методы и задачи оптимального управления. – М.: Наука, 1973.
2. Габасов Р., Кириллова Ф.М. Методы оптимизации. – Мн.: Вышэйшая школа, 1975.
3. Ковалевский В.Б., Панасюк В.И. Автоматика. 1992. №4. С. 23–29.
4. Ройтенберг А.Н. Автоматическое управление. – М.: Наука, 1971.
5. Смирнов В.И. Курс высшей математики. – М.: Наука, 1981.

УДК 621.7, 681.31

О МЕТОДЕ СОЗДАНИЯ ОБЪЕКТНО-ОРИЕНТИРОВАННЫХ БАЗ ДАННЫХ САПР

Кочуров В.А., Павловский М. С.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

Обеспечение надежного управления всем объемом разнородных данных, которые порождаются, хранятся и используются в различных информационных системах, осуществляющих информационную поддержку продукции в течение ее жизненного цикла, является актуальной задачей для современных предприятий.

В отличие от бумажного документооборота и простейших форм электронного документооборота, основанного на использовании электронных образов бумажных документов, в рамках CALS (Continuous Acquisition and Life Cycle Support) используются интегрированные информационные модели продукции и процессов — объекты, не имеющие прямых аналогов в традиционном бумажном документообороте: конструкторские данные, технологические данные, производственные данные, данные о качестве изделия, логистические данные и эксплуатационные данные об изделии.

Для организации этой информации был разработан и получил широкое применение международный стандарт ISO 10303 STEP (ГОСТ Р ИСО 10303), отличительной методологической особенностью которого является объектная ориентированность, т.е. он оперирует понятиями информационных объектов. Для работы с такими объектами служат специальные объектно-ориентированные системы управления базами данных (ООБД), однако применение последних приводит к ряду проблем.

Во-первых, ООБД являются пока немногочисленными, причем не существует ни одной некоммерческой ООБД. Кроме того, очень много информации уже накоплено в реляционных СУБД и конвертация этой информации для представления ее посредством ООБД будет очень дорога и нерентабельна. В тоже время для реализации объектной модели средствами реляционных СУБД не требуется прилагать сверхусилий.

На рис. 1 представлена, разработанная на кафедре САПР БНТУ логическая схема реляционной базы данных, в которую можно отобразить произвольную совокупность информационных объектов.

Предполагается, что база данных отображает определенную предметную область, состоящую из перечислимого множества объектов, причем

объекты могут быть простыми (неделимыми) объектами или объектами – контейнерами, содержащими в себе другие объекты. Выполним построение базы данных посредством следующих шагов:

- присвоим каждому объекту уникальный идентификатор `Id`, исполняющего роль уникального системного идентификатора, присвоим идентификатор `Name` — содержательное имя, с которым будет оперировать конечный пользователь и необязательный идентификатор `Description` — пользовательское описание объекта. Занесем эти данные в таблицу объектов `Object` и определим в качестве первичного ключа поле `Id`, а на поле `Name` наложим ограничение `Unique`;

- каждый объект этой предметной области характеризуется определенным набором атрибутов. Разобьем все объекты на классы (типы) по общности состава атрибутов. Присвоим каждому классу уникальный идентификатор `Id` и неформальное имя для конечного пользователя `Name`. Занесем эти данные в таблицу классов `Class` и зададим первичный ключ по полю `Id`, а ограничение `Unique` — по полю `Name`;

- каждый атрибут характеризуется именем, содержанием, а также типом значений: числовым, символьным и т.п. Присвоим каждому атрибуту уникальный идентификатор в качестве системного имени `Id`, неформальное имя для конечного пользователя `Description`, обязательное условное обозначение `Symbol` и указание базового типа значений — символьный, числовой и т.п. — в поле `Kind`. Занесем эти данные в таблицу атрибутов `Attribute`. Накладываем ограничение `Unique` на поля `Kind`, `Symbol`, `Description`.

- каждый класс может содержать некоторое количество атрибутов, и каждый атрибут может содержаться в более чем одном классе. Данное замечание позволяет сделать вывод о том, что классы и атрибуты находятся в отношении *n:m*. Это требует создания еще одной таблицы `Structure` для установления связи между классами и атрибутами, что позволит произвести в дальнейшем нормализацию. В качестве уникального идентификатора создадим поле `a Id`, поле `Att_Id`, которое будет являться внешним ключом по отношению к полю `Id` таблицы атрибутов и которое может выполнять роль имени поля таблицы в реляционной модели; поле `Class_Id`, которое будет являться внешним ключом по отношению к полю `Id` таблицы классов и которое может выполнять роль имени таблицы в реляционной модели; поле `In_Order` - порядковый номер атрибута в составе данного класса.

- отношение между именем атрибута и его значениями не всегда является равенством для информационных объектов САПР. Во многих случаях ими могут служить такие предикаты, как «находится в интервале», «следовать за или предшествовать», «находиться в отношении наложения» (напри-

мер, для обрабатываемых поверхностей) и т.п. Поэтому введем в нашу базу данных таблицу Predicate с двумя полями Id и Name. Первое из полей будет содержать уникальный системный идентификатор предиката, а второе — его общепринятое обозначение;

создадим таблицу Domain_Set, представляющую домен значений, которые могут принадлежать атрибутам, с полями Id и Name. Первое из них будет содержать уникальный системный идентификатор значения домена, а второе — собственно значение. Символьные значения могут быть переменной длины и представлять сложные лексемы. Создадим первичный индекс по полю Id и ограничение Unique по полю Name. Данная таблица содержит все значения атрибутов в символьном виде, даже если они обладают типом, отличным от строкового — числовым, вещественным, дата-время и т.д. Соответствующие преобразования и проверки осуществляются на клиенте. Возможна реализация модели с несколькими таблицами для хранения значений атрибутов — для каждого типа своя таблица. Но этот подход несколько усложняет реализацию, а потому он здесь не рассматривается.

наконец, создадим последнюю таблицу в логической схеме нашей базы данных — таблицу связей (фактов) Relation содержащую поля: Id, Str_Id, Obj_Id, Pred_Id, Dom_Id, Element.

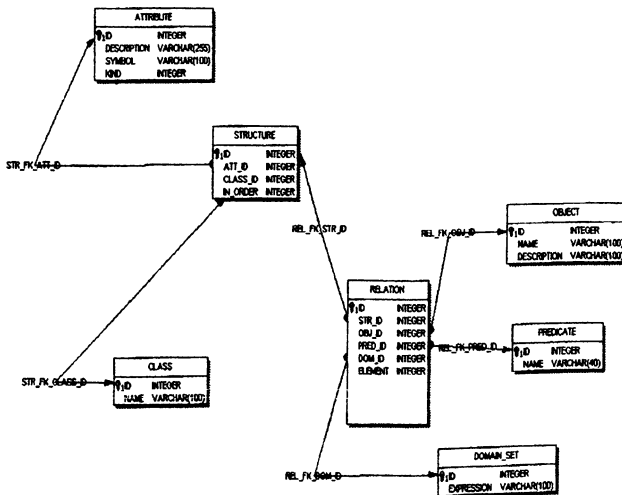


Рис. 1. Логическая схема базы данных

Поле Id является уникальным идентификатором в качестве системного имени.

Поле Str_Id «Идентификатор структуры» является внешним ключом по отношению к полю Id таблицы структур (Structure). Однозначно идентифицирует параметры атрибута в составе класса.

Поле Obj_Id «Идентификатор объекта» является внешним ключом по отношению к полю Id таблицы объектов (Object) и однозначно идентифицирует объект.

Поле Pred_Id «Идентификатор предиката» содержит ключ записи таблицы предикатов, идентифицирующий значение последнего.

Поле Dom_Id «Идентификатор значения» содержит ключ записи домена, содержащего данное значение.

Поле Element «Идентификатор элемента» содержит номер элемента (экземпляра типа элемента) в составе объекта — контейнера, хотя может применяться и любая другая уникальная в пределах одного объекта идентификация. Значение этого поля может исполнять роль физического номера строки таблицы в реляционной модели. Символьное представление нулевого значения соответствует атрибутам, характеризующих объект как единое целое.

Для таблицы связей Relation создаются следующие индексы:

- первичный индекс создается по полю Id и обеспечивает уникальность каждого элемента данных;
- уникальный индекс создается по полям Str_Id, Obj_Id, Pred_Id, Dom_Id, Element для обеспечения логической целостности данных, хранящихся в таблице Relation;

Повторяющееся значение в поле Obj_Id определяет всю группу значений признаков, относящихся к одному объекту. Повторяющееся значение в поле Class_Id таблицы Structure определяет все наборы данных одного структурного типа. Значение поля Att_Id таблицы Structure, с одной стороны позволяет проинтерпретировать любое данное, а с другой — выделить определенное свойство, присущее различным типам структурных объектов. Совместное задание Obj_Id, Str_Id позволяет выделить набор значений одноименного свойства всех экземпляров определенного элемента в составе заданного объекта.

На крупных предприятиях имеется множество отделов, организованных по принципу общности назначения работы — «Отдел главного технолога», «Отдел главного конструктора» и т.д. Представляется нецелесообразным ведение единой БД для всех отделов, т.к. это может значительно снизить скорость работы. Предлагается создание отдельных БД для каждого отдела. При необходимости получить информацию из БД другого отдела, клиент может

подключиться к любой другой БД этой структуры (при наличии у него прав для этого). Для централизации данного процесса предполагается создать дополнительный программный сервер, который будет знать о местоположении всех работающих БД и краткое описание их содержимого.

Для осуществления обмена информации между различными БД, построенных на данной технологии, предполагается использовать формат XML.

К настоящему моменту на кафедре САПР БНТУ создано две реализации изложенного подхода: первая реализация выполнена в виде СОМ-сервера в среде Visual FoxPro, а вторая в форме трехзвенной информационной системы с базой данных в Interbase и клиент-серверной частью в Delphi.

УДК 519.63

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД С ВЫРАБОТКОЙ

Журавков М.А., Напрасникова Ю.В.

Белорусский государственный университет

Минск, Беларусь

При проведении горных работ в окрестности выработки развивается такое напряженно-деформированное состояние (НДС) породы, при котором могут возникнуть трещины или произойти обрушение кровли выработки [1]. Поскольку при возникновении трещиноватости в область выработки могут проникать грунтовые воды, а обрушение кровли увеличивает опасность эксплуатации выработки, то необходимо уметь рассчитывать НДС в окрестности выработки.

В данной работе предлагается построение расчетной схемы и решение задачи в упругой постановке. На основе этой задачи с помощью существующих алгоритмов можно решить задачи, более приближенные к реальным, например, учесть реологические эффекты.

Постановка задачи

В настоящее время основным месторождением по добыче калийных солей в Беларуси является Старобинское месторождение.

Проанализировав геологический профиль этого месторождения, были выделены участки, имеющие одинаковую структуру. Поскольку выработка протяженная, то можно ввести предположение о плоском деформируемом состоянии и составить соответствующую расчетную схему.

Выработка располагается на глубине 1000 м, имеет следующие размеры — длина выработки 100 м, высота выработки 6 м. Размер рассматриваемой области выбирается таким, чтобы граничные условия не оказывали влияния на распределение напряжений и перемещений в окрестности выработки. Это достигается, когда расстояние от границы выработки до границы рассматриваемой области принимается равным, по крайней мере, шести длинам выработки.

Определяющими уравнениями являются уравнения Навье, которые имеют следующий вид:

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial X} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial Y} = 0$$

$$\frac{\partial \tau_{yx}}{\partial X} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial Y} - \rho * g = 0.$$

Здесь σ_x , τ_{xy} , σ_y — соответствующие напряжения, ρ — плотность материала в слое, g — ускорение свободного падения.

Предполагается, что напряжения возникают только под действием массовых сил тяжести.

Граничные условия имеют следующий вид

На боковых вертикальных гранях выделенной области:

- касательные напряжения равны нулю;
- нормальные напряжения равны $(-\nu\rho\gamma(H-y))/(1-\nu)\rho x$.

Здесь lx — компонента внешней нормали к соответствующей грани.

На нижней границе расчетной области:

- перемещения вдоль оси OY u равны нулю;
- касательные напряжения равны нулю.

На верхней границе и на контуре выработки:

- нормальные и касательные напряжения равны нулю (условия свободной поверхности).

Таким образом, мы построили двумерную расчетную схему для расчета многослойной среды при наличии выработки в предположении об изотропности материала в каждом из регионов в пределах упругого деформирования. Каждый из слоев имеет свои характеристики (модуль Юнга, плотность).

Для того чтобы убедиться в адекватности модели, было проведено тестирование, позволяющие сравнить результаты численного расчета с известными аналитическими решениями.

Рассматривалась тестовая задача определения НДС в массиве горных пород с горизонтальной одиночной выработкой кругового поперечного сечения.

Полученные результаты, численного решения по определению НДС в массиве с подземной выработкой хорошо согласуются с аналитическим решением.

Построение характерных зон подрабатываемого массива

Таким образом, теперь можно перейти к рассмотрению расчетной схемы для реальной задачи.

Известно, что механические процессы в массиве горных пород при производстве горных работ связаны с формированием дополнительных смещений (это обусловлено тем, что механические процессы, связанные с формированием начальных смещений, вследствие наличия гравитационных сил, давно закончились).

Таким образом, для оценки распределения смещений в породном массиве следует построить полное поле смещений, соответствующее полному полю напряжений. Затем из полного поля смещений необходимо вычлест начальное поле смещений, соответствующее начальному напряженному состоянию массива. Причем такая методика оценки распределения смещений справедлива для породных массивов, подчиняющихся как линейному, так и нелинейному законам деформирования. То есть выработка проводится в ранее нагруженном массиве, в котором деформации от воздействия гравитационных сил уже произошли.

Для доказательства корректности использования предложенных схем при выполнении численного моделирования и исследования геомеханических процессов в подработанной породной толще решалась еще одна тестовая задача по выделению характерных зон в подработанном массиве горных пород.

На рис.1 — рис.3 представлены результаты компьютерного решения соответствующей задачи. Рассматривалась область породной толщи с очистной выработкой ширины 100 м и высотой 6 м.

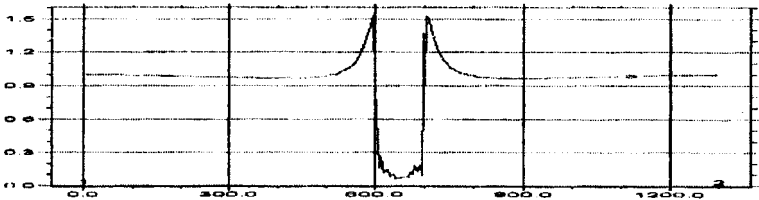


Рис. 1. Распределение отношения $\sigma_1/\gamma H$ (опорного давления) по горизонтальной прямой (координата x) по кровле выработки

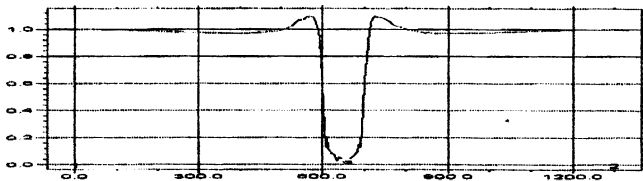


Рис. 2. Распределение отношения $\sigma_1/\gamma H$ (опорного давления) по горизонтальной прямой (координата x) на линии, находящейся на 10 м выше кровли выработки

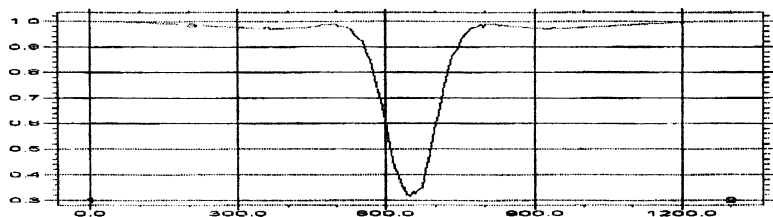


Рис. 3. Распределение отношения $\sigma_1/\gamma H$ (опорного давления) по горизонтальной прямой (координата x) на линии, находящейся на 50 м выше кровли выработки

На рис. 1 – рис. 3 представлены картины распределения горного давления на разных горизонтах породной толщи от обрабатываемого пласта. Как следует из этих рисунков, полученная в результате расчетов картина распределения горного давления полностью соответствует картине, построенной по результатам аналитических и экспериментальных исследований:

- в области выработанного пространства наблюдается область разгрузки (горное давление меньше по величине уровня естественного напряженного состояния);

- с удалением от обрабатываемого пласта наблюдается уменьшение максимального значения опорного давления, а зона опорного давления расширяется.

На рис. 4 показан фрагмент рассчитанной области разрушения массива горных пород, непосредственно примыкающей к кровле выработки (область напряжений растяжения). В пределах 8 м от границы выработки мощность зоны разрушения не превышает высоты выработки.

На рис. 5 изображены изолинии распределения максимальных касательных напряжений. Как следует из приведенного рисунка, они совпадают с аналогичными картинками, полученными другими способами и приведенными в литературных источниках. Используя предельное условие вида $\tau_{\max} < \tau_{\text{lim}}$, можно определить область, в которой проявляются линии скольжения (зона трещиноватости). Например, при $\tau_{\text{lim}} = 0,6 \cdot 107 \text{ Па}$ эта область будет распространяться не более чем на 75 м.

Таким образом, получены следующие результаты:

- Сформулирована задача по расчету НДС в окрестности горной выработки в предположении об изотропности материала и наличии слоев с различными свойствами в пределах упругого деформирования

- Получена расчетная схема для соответствующей граничной задачи

- Выполнено тестирование расчетной схемы на известной задаче о НДС вокруг круглой выработки. Результаты тестирования показали хорошее со-

наделение численного и аналитического решений, что дает уверенность в правильности выбора расчетной схемы

— При расчетах на основе реальной расчетной схемы получены картины распределения напряжений и смещений и характерные зоны подрабатываемого массива. Геометрия полученных зон согласуется с экспериментальными данными.

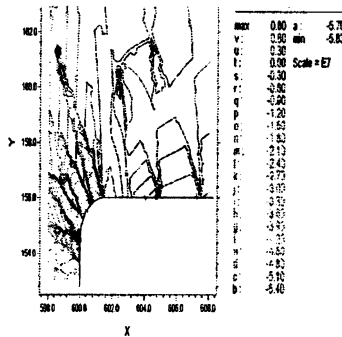


Рис.4. Область растяжения в окрестности кровли выработки

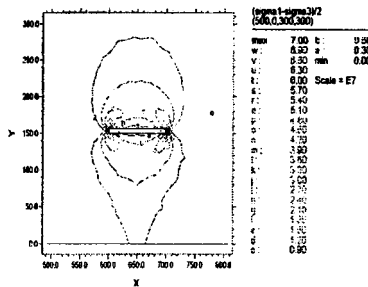


Рис.5. Изолинии расчетных значений $\tau_{\max} = (\sigma_1 - \sigma_3)/2$ в окрестности выработанного пространства

Вывод: Предложенная численная модель может быть использована в качестве основы для более детального изучения поведения породы в окрестности выработки при введении физической нелинейности в поведении материала и зависимости от времени.

1. Журавков М.А., Мартыненко М.Д. Теоретические основы деформационной механики блочно-слоистого массива соляных пород. Мн.: Універсітэцкае, 1995. —255 с.

УДК 621.002

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТАКТОВЫХ ЦИКЛОГРАММ РАБОТЫ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Пекарчик С.Е.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

Циклограммы являются гостированным документом, входящим в состав «Руководства по эксплуатации», поставляемого заказчику технологического оборудования. Они в компактном виде знакомят с работой технологического оборудования, а также облегчают и ускоряют поиск неисправностей, возникающих в процессе эксплуатации станка или автоматической линии. Циклограммы, как правило, входят в состав документа «Схема электрическая структурная» (схема Э1).

Тактовые циклограммы необходимы для синтеза основного документа проекта оборудования «Схема электрическая принципиальная» (схема Э3), незаменимы для служб наладки и эксплуатации оборудования при изучении цикловой последовательности работы механизмов станка.

Программа проектирования одного из документов пакета электрооборудования станка — тактовых циклограмм, выполнена специально для СКБ Минского завода автоматических линий.

Поскольку выходная документация, т.е. временная циклограмма, представляет собой графическую документацию, то для создания системы автоматизированного проектирования (САПР) тактовых циклограмм была выбрана одна из российских разработок — среда параметрического проектирования T-Flex CAD.

Во-первых, эта CAD-система активно использовалась в СКБ АЛ на протяжении нескольких лет и успела зарекомендовать себя среди конструкторов.








Во-вторых, среда T-Flex CAD позволяет создавать параметрические чертежи только средствами системы без написания дополнительных программ. Эта возможность была изначально заложена разработчиками T-Flex CAD.

В-третьих, T-Flex CAD позволяет подключать пользовательские программы, а также имеет библиотеку ActiveX функций, что дает возможность управлять объектами T-Flex CAD из других приложений, в том числе из пользовательских программ, написанных в каких-либо средах программирования (в данном случае в Delphi). Эта возможность позволила решить вопрос о взаимодействии программы проектирования циклограмм с T-Flex CAD.

Проектирование циклограммы можно сравнить с процессом собирания конструктора. Циклограмма как бы «склеивается» из отдельно взятых кусочков — фрагментов. Под фрагментом циклограммы, как и в T-Flex CAD, следует понимать параметрический чертеж, включаемый в сборочный. В качестве последнего выступает тактовая циклограмма.

Все фрагменты поделены на классы согласно их функциональному назначению на циклограмме. В качестве критериев объединения выступали смысловое обозначение и внешний вид.

На основании этих признаков были выделены следующие классы фрагментов:

-  — стрелки движений;
-  — стрелки команд;
-  — блоки аппаратов;
-  — элементы и/или;
-  — выноски;
-  — вспомогательные элементы;
-  — форматки.

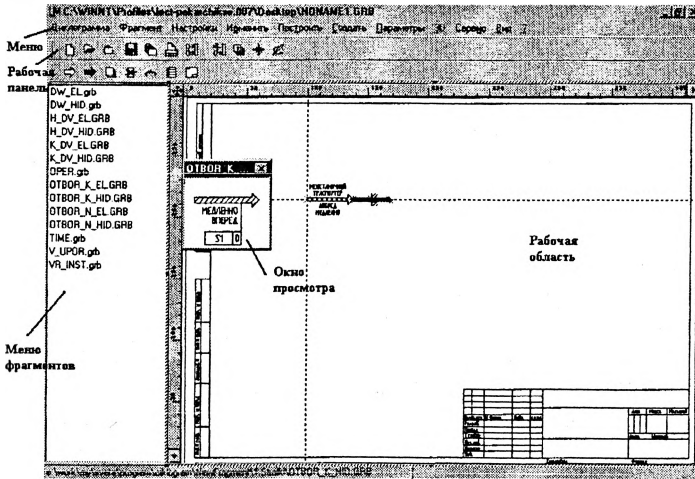


Рис. 1. Интерфейс пользователя САИПР циклограмм

Если фрагменты нужного класса уже отображены в меню фрагментов (рис. 1), то следует выбрать нужный фрагмент для вставки в циклограмму двойным щелчком мыши на его имени, точнее на имени файла фрагмента.

Затем необходимо определить параметры фрагмента, т.е. надписи. После этого фрагмент отобразиться на циклограмме.

В T-Flex CAD фрагмент может быть вставлен в чертёж при помощи точки привязки или вектора привязки. При проектировании тактовых циклограмм используется первый способ.

Число точек привязки тщательно продумывалось при создании файлов фрагментов, т.к. оно должно быть оптимальным. Большое количество точек привязки усложнит работу с фрагментом, поэтому максимальное их число составляет три. К примеру, у стрелки электрического движения две точки привязки — в начале и конце (рис. 2).



Рис. 2. Точки привязки фрагмента «Движение электрическое» У блока аппаратов — одна (рис. 3).



Рис. 3. Точки привязки фрагмента «Блок аппаратов»

Каждый последующий фрагмент привязывается к именованному узлу, созданному с предыдущего фрагмента. Таким образом, каждый предыдущий фрагмент является как бы предком для последующего. При удалении родительского фрагмента удаляется и вся последующая цепочка созданных от него элементов. Этот принцип был заложен в T-Flex CAD и используется при проектировании циклограмм.

Для облегчения процесса вычерчивания в программе проектирования тактовых циклограмм процесс вставки и «склейки» фрагментов между собой происходит автоматически. Пользователь выбирает в окне фрагментов нужный, а затем этот фрагмент привязывается к последнему созданному на чертеже узлу. Т.е. если на чертеже был изображен блок аппаратов, то следующая за ним стрелка гидравлического движения привяжется к именованному узлу uzell, созданному с фрагмента BLOCK_APP (рис. 4).

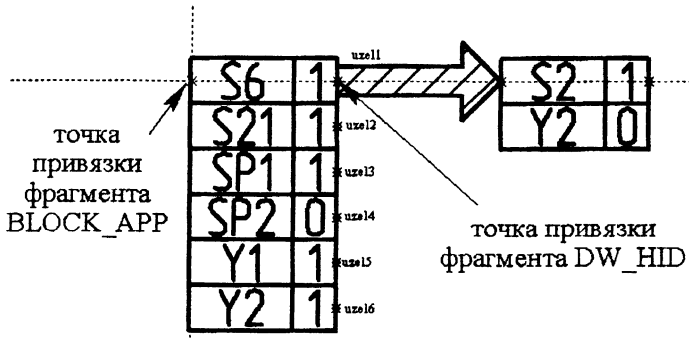


Рис. 4. Узлы и точки привязки фрагментов

В автоматическом режиме размеры вставляемых элементов изменяются и форматируются благодаря широким возможностям параметризации, заложенными разработчиками T-Flex CAD.

Помимо возможностей, присущих T-Flex CAD (копирование, удаление, редактирование фрагментов), в программе проектирования тактовых циклограмм есть возможность автоматической привязки фрагментов при вставке в циклограмму, вставки фрагмента в середину последовательности тактов и удаления из цепочки.

При вставке фрагмента в середину цепочки указывается фрагмент, после которого будет вставлен новый (рис. 5). Затем последовательность разрывается, и в середину вставляется новый фрагмент, а оставшая цепочка привязывается к нему (рис. 6).

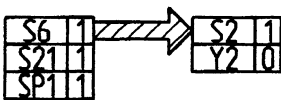


Рис. 5. Цепочка фрагментов до вставки

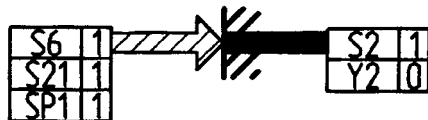


Рис. 6. Цепочка фрагментов после вставки

Удаление из середины последовательности тактов происходит путем выбора фрагмента, который необходимо удалить. Затем цепочка сдвигается.

При удалении из последовательности тактов фрагмент не просто удаляется, как это реализовано в T-Flex CAD. Следующая за ним цепочка тактов привязывается к предшествующему фрагменту. Таким образом, на чертеже не образуется пустых мест, и не нужно исправлять вручную.

Команда удаления фрагмента без сдвига последующих тактов тоже пригодилась, только ее пришлось заново реализовать при помощи библиотеки ActiveX функций T-Flex CAD.

Благодаря вышеописанным методам, выходной документ, получаемый в результате проектирования, т.е. тактовую циклограмму работы станочного оборудования, можно представить в виде, показанном на рис. 7.

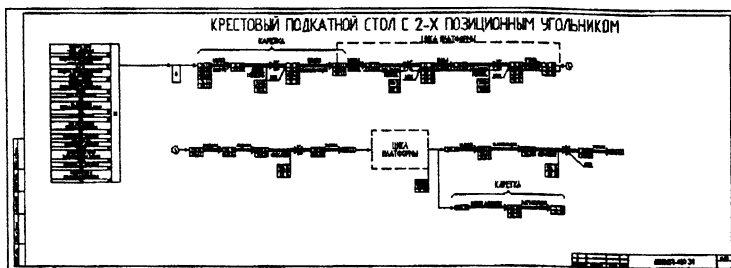


Рис. 7. Тактовая циклограмма работы крестового подкатного стола

В заключении еще раз отметим, что программа проектирования тактовых циклограмм написана с использованием Active X функций T-Flex CAD. Значит, для ее работы обязательно присутствие на компьютере среды параметрического проектирования T-Flex CAD, что влечет за собой как достоинства (например, возможность дополнительного использования функций T-Flex CAD в работе), так и трудности, которые мы постарались преодолеть.

УДК 681.327

СИСТЕМА ПЕРЕВОДА РАСТРОВОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ В ВЕКТОРНОЕ

Буча В.В., Буча О.А., Ковалева И.Л.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

Введение

Сегодня уже для всех стало привычным понятие электронного документа. Для набора текста используется текстовый редактор Word, чертеж получается в AutoCad. Однако только небольшой процент новых документов создается с нуля. Чаще новый документ, новый проект создаются на основе уже имеющихся путем внесения изменений и корректировки. Если имеющиеся документы представлены только на бумажных носителях, то оптимальным способом их перевода в электронный вид является использование сканера.

После сканирования получается так называемое растровое изображение, или набор точек. Однако большинство систем автоматизированного проектирования (САПР) работают с векторной графикой — математически описанными графическими объектами. Перевод растрового изображения в векторную графику может быть выполнен в процессе векторизации. Векторизация, как правило, выполняется на утоньшенном растровом изображении. Поэтому одной из основных задач предварительной обработки растрового изображения является его утоньшение.

Утоньшение изображения

Алгоритмы утоньшения были и продолжают оставаться объектом пристального изучения в рамках проблематики обработки изображений и распознавания образов.

При реализации алгоритмов утоньшения за основу взято понятие «остовный пиксел».

Определение : Остовом множества пикселей R называется множество, формируемое следующим образом: сначала определяются пиксели остова (обозначим их P) и пиксели контура, принадлежащие множеству R . После этого все пиксели контура, не являющиеся остовными, удаляются и, полученное в результате этой процедуры, множество заменяет множество R . Этот процесс повторяется до тех пор, пока не будет сформировано множество, включающее только остовные пиксели.

Отнесение пикселей к категории остовных ведется на основании анализа конфигурации окрестных пикселей.

Программная реализация алгоритмов, основанных на конфигурациях, приведенных в [1,2], показала, что при использовании этих конфигураций наблюдается эффект стягивания изображения в один пиксел. Авторы источников, из которых были взяты тестируемые конфигурации, упоминают о возможности эффекта стягивания, но нигде не приводят четкого готового решения для его исключения.

Для исключения эффекта стягивания предлагается остовным пикселом считать пиксел, который имеет одного соседа (рис.1).

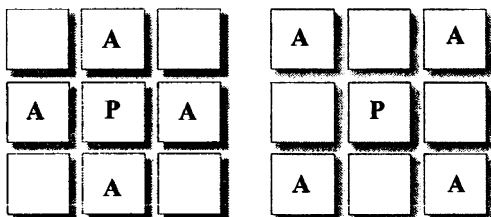


Рис.1. Пиксел P— остовной. Один пиксел из группы A и центральный пиксел имеют ненулевое значение

Пример работы алгоритма утоньшения, реализующего подход, предложенный выше, приведен на рис.2.

Векторизация

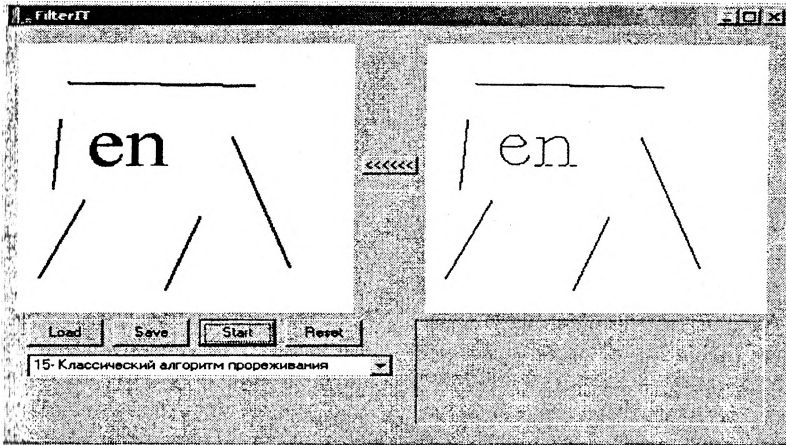
Существуют различные методы векторизации: отслеживающие, сканирующие и их комбинации. Описываемая система перевода растрового изображения в векторное реализует комбинацию методов.

Процесс векторизации начинается с того, что каждый пиксель утоньшенного растрового изображения анализируется на основании его связности с восемью соседними пикселями и помечается определенным образом. Все черные (единичные) пиксели растра в зависимости от расположения окружающих их пикселей в определенной окрестности классифицируются как конечная точка, элемент линии (промежуточная точка) и узловая точка. Изолированные пиксели отбрасываются. Из такого размеченного растра выбираются ключевые точки, т.е. пиксели, помеченные как конечные и узловые. Их координаты запоминаются в соответствующих массивах. Дальше, начиная с этих точек, отслеживаются объекты изображения, и формируется вектор, координаты которого заносятся в соответствующий массив.

Для выполнения векторизации автоматически рассматриваются все возможные комбинации связей ключевых точек:

1. конечная точка — конечная точка
2. конечная точка — узел

3. конечная точка — угловая точка
4. узел — узел
5. узел — конечная точка
6. узел — угловая точка
7. угловая точка — угловая точка
8. угловая точка — узел
9. угловая точка — конечная точка
10. промежуточная точка — промежуточная точка (распознавание окружности).



а) исходное изображение

б) тонкое изображение

Рис.2. Результат работы алгоритма утоньшения

Те комбинации ключевых точек, которые связаны между собой промежуточными точками, формируют вектор. Изолированные пиксели отбрасываются.

В процессе векторизации обрабатываются ситуации, связанные с определением коллинеарности ключевых и промежуточных точек. Если промежуточные точки коллинеарны, то вектор, соединяющий ключевые точки, является отрезком, если нет — кривой.

Определение принадлежности линии к классу прямых и дуг

В системе используется алгоритм, отслеживающий изменения тангенса наклона набора промежуточных точек. Идея алгоритма была позаимствована из «Субоптимального алгоритма построения линий по точкам» [2]. Алгоритм был проверен и доработан. В его основу положено следующее утверждение:

Утверждение: Если точка (u, v) не принадлежит прямой, то ее расстояние от этой прямой равно $\frac{d}{L}$, где $d = u \cdot (y_1 - y_2) + v \cdot (x_2 - x_1) + y_2 \cdot x_1 - y_1 \cdot x_2$,

$$L = \sqrt{(y_1 - y_2)^2 + (x_2 - x_1)^2}, \text{ где}$$

x_1, y_1 — начальные координаты отрезка;

x_2, y_2 — конечные координаты отрезка;

u, v — координаты промежуточной точки.

Знак при $\frac{d}{L}$ указывает, с какой стороны от прямой находится точка. Если в задачу не входит определение, с какой стороны от прямой находится точка, а только — нахождение расстояния от этой точки до прямой, то d можно считать по модулю.

Проверку коллинеарности обеспечивает вычисление $\frac{d}{L}$ для всех промежуточных точек. Можно задать максимальное значение расстояния таким образом, что точки множества не будут считаться коллинеарными, если какая-нибудь из них отстоит от прямой на расстояние, большее заданного максимума.

Заключение

Разработанная система перевода растрового изображения в векторное позволяет облегчить анализ и обработку изображения (векторный формат лучше приспособлен к сохранению логических отношений объектов графического документа). Система выполняет векторизацию отрезков, многоугольников, окружностей и кривых. Разработан и реализован алгоритм, который распознает множественное пересечение графических примитивов. Имеется возможность экспортировать полученное векторное изображение в графическую систему AutoCAD или записывать координаты полученных векторов в файл. Для экспорта полученного векторного описания использовались объектная модель AutoCad и технология OLE/COM.

Литература

1. Абламейко С.В., Лагуновский Д.М. Обработка изображений: технология, методы, применение — Минск, 1999
2. Павлидис Т. Алгоритмы машинной графики и обработки изображений: Пер. с англ. — М.: Радио и связь, 1986 — 400с.

УДК 621.865.8

КОНЦЕПЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО МОБИЛЬНОГО РОБОТА

Новичихин Р.В., Шардыко П.П., Кустиков А.А.

Белорусский национальный технический университет

Минск, Беларусь

В последнее время в мире наблюдается бурное развитие мобильных роботов (МР). Они призваны устранить или сократить присутствие человека в опасных ситуациях и средах. Будучи оснащенными различными бортовыми средствами, они превращаются в мобильные робототехнические комплексы (МРТК) специального назначения. В задачи таких МРТК может входить ликвидация последствий чрезвычайных ситуаций, ведение радиационной, химической и боевой разведки, предотвращение террористических актов (разминирование, охрана, прикрытие), исследование планет и пр. Некоторые из этих задач актуальны для РБ. Научный и производственный потенциал республики позволяет создавать МР самостоятельно.

Целью данной научно-исследовательской работы является разработка концепции базового МР, который служил бы единой основой для создания различных модификаций МРТК специального назначения. Кроме того, базовый комплект МР должен использоваться, в качестве универсальной экспериментальной установки для быстрого макетирования, исследования, испытания и доводки различных компоновок МР.

Для достижения этой цели решались следующие задачи:

- создание компьютерной базы данных по известным проектам и образцам МР;
- статистический анализ характеристик МР и применяемых технических решений;
- обобщение мирового опыта, выявление тенденции и перспективных направлений в развитии МР;
- разработка концепции базового МР на основе мирового опыта и с учетом условий, возможностей и имеющихся наработок в РБ.

Созданная база данных содержит подробные сведения, включая фотографии и схемы, по 100 образцам и проектам МР. Источниками информации служили открытые публикации и Internet. База реализована в среде Access. В базе данных используются следующие признаки классификации МР: назначение, функции, массогабаритные характеристики, маневренность и проходимость (база, просвет, колея, высота препятствия, радиус поворота, угол опрокидывания и скольжения), скорость, радиус действия, время автоном-

ной работы, тип привода, тип двигателя, тип источника энергии, способ управления, состав и характеристики информационной системы, наличие и характеристики бортового манипулятора, состав и характеристики специального оборудования.

В базе данных МР по назначению делятся на следующие группы:

- саперные (обследование, обезвреживание, разрушение, изоляция, буксировка),
- пожарные (обследование, выявление, тушение, поиск людей, доставка средств защиты, эвакуация, расчистка или указание проходов),
- спасательные (обнаружение, доступ, оснащение, инструктирование, эвакуация),
- научно-исследовательские, включая планетоходы,
- разведовательные (обстановка, радиационное и химическое заражение),
- охранные (стационарное наблюдение и патрулирование, досмотр, проверка наличия),
- инженерные (расчистка, буксирование, обследование технического состояния, диагностика, ремонт),
- боевые (поражение снайперов, доставка зарядов, целеуказание, прикрытие),
- развлекательные (киносьемочные персонажи и муляжи, игрушки, спортсмены).

Общим требованием ко всем этим роботам является высокая мобильность и проходимость. Эти качества определяются прежде всего типом двигателя. В известных моделях РМ встречаются следующие решения по шасси: колеса (58%), гусеницы (36%), шагающий педипулятор (4 модели), катки (2), корпус — катящийся шар (1), корпус — шар со складывающимися лепестками (1), корпус — изгибающийся и «кувыркающийся» на присосках (1), толкающие рычаги — «кузнечик» (1), многосекционный корпус, перемещаемый по частям (1), воздушная подушка (1).

Основные решения по силовому приводу следующие: электродвигатели постоянного тока (95%), двигатель внутреннего сгорания, гибридный (ДВС — электрогенератор — электродвигатель). Соответственно, источниками энергии являются аккумуляторные батареи (70%) или топливо. Известны разовые случаи применения газотурбинного двигателя, солнечных батарей.

92% МР имеют только дистанционное управление, остальные — с элементами автономного автоматического управления, в том числе и с использованием искусственного интеллекта.

90% МР управляются по радиоканалу, 6% — по электрическому или оптоволоконному кабелю, остальные — чередуют или дублируют эти оба способа. Есть случаи управления лазерной ИК-системой.

Информационно-управляющая система обычно включает:

- телекамеры (переднего и заднего вида для вождения, обзорную, ближнего вида рабочей зоны манипулятора, иногда — вида реконфигурируемого или фронтального элемента шасси),
- датчики внутренней и внешней информации,
- средства визуализации и обратной связи (монитор, шлем с индикацией, динамик, вибратор и др.),
- органы управления перемещением, манипуляциями, спецсредствами (пульт, джойстик, руль, шлем с датчиком поворота, экзоскелетон и др.),
- приемо-передающая аппаратура,
- управляюще-вычислительный комплекс (промышленный компьютер, ноутбук).

Постоянный или съемный бортовой манипулятор имеют 78% МР. Обычно это антропоморфная конструкция с электроприводами на основании, с 5–6 степенями подвижности, грузоподъемностью 1–10 кг.

Средством доставки МР к месту действий обычно является: специально оборудованный микроавтобус, штатная транспортная или боевая машина, вертолет. Легкие разведывательные МР часто выполняются в носимом и бросаемом варианте. Рабочее место оператора может быть автономным или оборудовано в средстве доставки.

Другие характеристики МР: масса до 150 (65%) — 800 (30%) кг, скорость 1–20 км/ч, автономность 1–7 ч.

Обращает на себя внимание, что МР даже одного назначения отличаются большим разнообразием решений, особенно по ходовой и силовой части. То есть, на сегодня нет единого мнения о том, какие схемы должны применяться в тех или иных условиях. Многочисленные предложения и реализации недостаточно теоретически обоснованы, их практическая проверка осуществляется, как правило, безальтернативно. Опыт реального применения МР также еще недостаточен для однозначных рекомендаций. Преобладает мнение, что и в будущем для каждого применения необходимо будет опробовать по несколько вариантов, чтобы остановиться на лучшем. Вопрос, как обеспечить эту вариантность, остается открытым.

В результате анализа мирового опыта и располагаемых возможностей была сформулирована концепция базового МР для исследования, отработки вариантов и комплектования различных модификаций для практического применения. При разработке концепции учитывались наработки специали-

тов БНТУ (математическое и программное обеспечение манипуляторов, силомоментные сенсорные системы, комплексный электропривод, гидропривод, ходовая часть), ПСЗ «Оптрон» (мехатронный привод, мобильные транспортные средства), НПО «Гранат» (манипуляционные механизмы).

Особенностью предлагаемой концепции МР является его многофункциональность, модульность, трансформируемость, внутреннее очувствление.

Основой всех модификаций МР служит унифицированная одноосная транспортная секция с встроенными в каждую ступицу оси индивидуальным электроприводом.

На ступицу оси можно установить колесо, гусеничный каток, звездочку, шестерню или рычаг.

Комплект стыковочных узлов секций позволяет комбинировать различные варианты их соединения:

- жесткое соединение (рама),
- поступательное вертикальное соединение (ступенчатая или поддресоренная рама),
- телескопическое горизонтальное соединение (рама с переменной базой),
- шарнирное соединение (седельный, ломающийся или скручивающийся прицеп),
- приводное подвижное соединение («ломающаяся» рама).

Последний случай предназначен для резкого уменьшения габаритов и радиуса поворота МР в труднодоступных местах, для изменения геометрии гусениц при преодолении препятствий типа «бордюр», «ступеньки» и «барьер», для смещения края опорной поверхности относительно центра тяжести МР при преодолении препятствий типа «склон» и т.д. Для изменения взаимного углового положения секций используются электроприводы осей самих секций. Каждая секция может использоваться чисто как движитель, дополнительно нести источник энергии для себя и всех остальных секций, нести спецоборудование.

Относительная автономность секций, их вариантность исполнения, переменное количество и произвольный способ стыковки позволяют компоновать все известные, а также гипотетические схемы МР.

Помимо самоходного шасси на базе секций в механическую подсистему базового МР также входит:

- энергетические модули (аккумуляторный и гибридный),
- универсальная грузовая или монтажная платформа для спецоборудования,
- съемный бортовой манипулятор,

- магазин сменных рабочих органов для манипулятора.

Ориентировочные характеристики базового МР:

- грузоподъемность тележки — 120 кг,
- грузоподъемность манипулятора — 2,5 кг,
- время автономной работы — 2–5 ч,
- скорость перемещения — 0,5...20 км/ч,
- радиус действия — 100 м (кабель), 5 км (радио),
- привод — электрический постоянного тока,
- источник энергии — аккумуляторные батареи,
- движитель — колесный, гусеничный, рычажный, комбинированный,

(в том числе и с изменяющейся геометрией).

В настоящий момент проект находится в следующем состоянии: отрабатываются различные варианты конструктивного исполнения сочленения секций, проводятся расчеты и графическое моделирование для оценки проходимости различных комбинаций секций и для оптимизации их параметров, создается макет на базе серийного промышленного робота для отработки системы дистанционного управления манипулятором, уточняются основные тактико-технические характеристики базового МР.

УДК 621.311.017.004.18:683.3

АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ УЧЕТА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ И ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Москаленко А.А., Харлан С.Б., Позник Ю.Н., Кудина Г.А.

Белорусский национальный технический университет,

Концерн «Белэнерго»

Минск, Беларусь

Данные программы служат для учета оплаты, потребления и задолженностей за электрическую и тепловую энергию по предприятиям с группировкой по министерствам. Программа Долг98 состоит из двух частей: для областей и для районов. Программа Adolg98 имеет две базы данных: оперативную и архивную, то есть с накоплением. Это значительно усложняет программное обеспечение, но в то же время позволяет расширить функциональные возможности и обеспечивает гибкость для анализа и вывода данных за любой период времени.

Кроме оперативной базы данных, в которой обрабатываются текущие сведения, была разработана также и архивная база данных. Оператор в области после обработки информации, полученной из районов, и распечатки выходных форм перед вводом новых данных сохраняет их в архивной базе данных. Это дает возможность в любой момент извлечь сведения за любой период. Таким образом, архивная база данных является накопительной, содержащей сведения за все время работы программы. Она позволяет оператору хранить резервную копию текущих данных.

В отчетах выводятся все сведения по предприятиям и отдельно итоговые суммы по министерствам. Вывод данных осуществляется как из базы данных (БД), так и расчетных значений на их основе в дополнительно формируемые поля. В настоящее время в отчетах выводятся 13 полей с данными, из которых 7 полей принадлежат БД, а 6 полей являются расчетными. Формулы, использованные при расчетах, совпадают с формулами концерна «Белэнерго».

Идентификационные номера межрегиональных отделений назначаются Энергонадзором и не могут быть изменены в отделениях, так как содержатся в Справочнике только областной программы. Идентификационные номера отделений служит для идентификации отделений при импорте и обработке данных.

Справочник министерств присутствует во всех программах. Он содержит уникальный номер группы министерства и его наименование. Справочник служит для группировки данных по министерствам для вывода информации оператору и в отчетах.

Справочник предприятий отсутствует в концерне «Белэнерго»; в области он называется «Справочник экспортируемых предприятий» и содержит номер группы министерства, номер предприятия и его наименование. Он предназначен для определения предприятий, сведения по которым экспортируются в концерн «Белэнерго». При экспорте имена заносятся из справочника, а не из БД. Такое решение принято Энергонадзором во избежание получения разных вариантов имен при сокращении в их наименовании. Справочник редактируется оператором области. В отделениях он служит для автоматического занесения в оперативную БД идентификационных номеров предприятий и их группы при установке нового периода отчетности; редактируется оператором отделения. В БД добавлены две таблицы, которые обрабатываются в автоматическом режиме и не известны оператору.

По требованию концерна в базу данных Энергонадзора были введены новые поля: «Отсрочки, предоставляемые решением правительства» и «Ограничения». С учетом этих требований разработаны модули и подпрограм-

мы, поддерживающие новые поля. Однако временно на данном этапе они не будут использоваться, так как передача в концерн «Белэнерго» будет осуществляться по старым правилам, чтобы обеспечить совместимость с другими областями, в которых отсутствует возможность работы по новым правилам. Следует иметь в виду, что поле «Отсрочки» введено для внутреннего использования в базе данных, отчетах и т.д., а поле «Ограничения» визуальнo нигде не используется. Это сделано для быстрого ввода в эксплуатацию программы в полном объеме, когда вступят в силу новые правила.

Введено поле даты, которое содержит не только месяц, год, но и число, что не соответствует концерну. Это вызвано необходимостью хранить множество данных за каждый месяц с сохранением в архивной базе данных, так как отчетность по предприятиям производится еженедельно.

Программное обеспечение разработано в среде Delphi 6.0 и эксплуатируется в Минской области.

ИД	ИМЯ	ВР. В. АН.	СЧЕТ	ПРЕД.	ОП.	ПРЕД.	СЧЕТ	ТЕП.	ТЕП.	МАСС.
01	5 РИМТ "Крыльчица" г.Ляска	0	95	20	00	00	00	00	00	00
01	10 РИМТ "Брестский радиотехнический завод" г.Брест	0	69	19	69	19	69	19	69	19
01	15 ОАО "Брестский радиотехнический завод" г.Брест	0	109	5	109	5	109	5	109	5
01	20 ТП "Ляска" Каменец г. Ляска	0	37	11	37	11	37	11	37	11
01	25 "Электротехнический завод" г.Брест	0	122	24	122	24	122	24	122	24
01	30 "Электротехнический завод" г.Барановичи	0	247	0	247	0	247	0	247	0
01	35 РИМТ "Полесье радиотехника" г.Полесье	0	113	22	113	22	113	22	113	22
01	40 "Барановичский радиотехнический завод" г.Барановичи	0	69	69	69	69	69	69	69	69
01	45 "Кобеляцкий радиотехнический завод" г.Ситово"	0	51	0	51	0	51	0	51	0
01	50 За "Червоны" г.Брест	0	154	19	154	19	154	19	154	19

Рис.2. Общий вид программы

РИМТ "Крыльчица" г.Ляска

Введенные с ноября года	Плюсено с ноября года	Введенные с ноября года
55	20	55
Введенные с ноября года	Введенные с ноября года	Введенные с ноября года
20	10	1.32

Сохранить Отменить

Рис.3. Окно редактирования

Справочник министерств	
№ ГР.	НАИМЕНОВАНИЕ
▶ 01	МИНПРОМ
02	БЕЛЛЕСБУМПРОМ
03	БЕЛЛЕГПРОМ
04	МИНСТРОЙАРХИТЕКТУРЫ
06	БЕЛНЕФТЕХИМ
07	БЕЛБИОФАРМ
08	МИНСЕЛЬХОЗ
09	БЕЛМЕСТПРОМ
10	ДРУГИЕ ПРЕДПРИЯТИЯ
12	СЕЛЬХОЗОРГАНИЗАЦИИ
13	МИНЖИЛКОМХОЗ
14	БЮДЖЕТНЫЕ ОРГАНИЗАЦИИ

Рис.4. Справочник министерств

УДК612.9.06-529, 681

ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭКСПЕРТНЫХ СИСТЕМ В УЧЕБНОМ ПРОЦЕССЕ

Новичихин Р.В., Лобовкин М.И., Новичихина Е.Р.
Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

Актуальность проблемы.

При подготовке специалистов в области автоматизации производства и робототехники возникает необходимость в программах, реализующих концепцию искусственного интеллекта, в частности, оперирующих знаниями (эвристиками) экспертов. Такие экспертные системы (ЭС) позволяют, во-первых, автоматически получить проектные решения, во-вторых, в процессе самостоятельного заполнения ее знаниями лучше понять предметную область, и, в-третьих, уяснить, что собой представляет и как работает сам искусственный интеллект.

Объект исследования и разработки.

На кафедре робототехнических систем БНТУ разработана и применяется оболочка ЭС, специализированная для учебных целей. Будучи заполнен-

ной конкретными знаниями, такая «пустая заготовка» превращается в готовый инструмент автоматизированного решения практически любых задач.

Цель и задачи разработки.

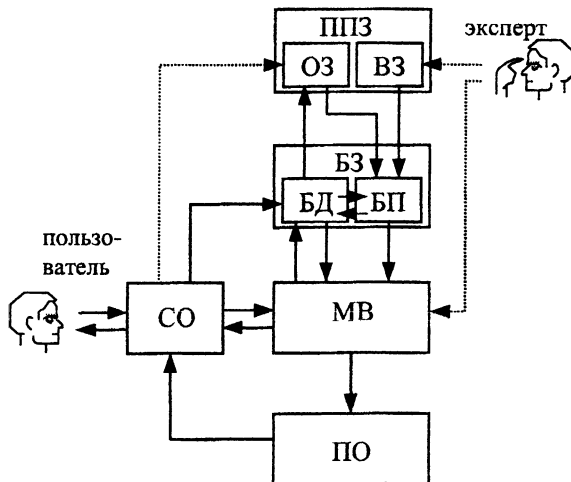
При разработке оболочки ставилась цель сделать ее пригодной для самостоятельного использования студентами в различных дисциплинах и видах занятий. Для этого она должна быть максимально дружественной, легко настраиваемой, наглядной и с обучающим эффектом. Известные оболочки набором таких качеств не обладали.

Для достижения поставленной цели оболочка должна отвечать следующим требованиям:

1. Простота и интуитивность интерфейса.
2. Учет достоверности и случайностей.
3. Учет приоритетов и исключений.
4. Гибридность (объединение экспертных и вычислительных задач).
5. Интегрированность и распределенность (возможность включения в себя другие учебные программы и наоборот).
6. Настройка параметрическая и диалоговая (только с помощью меню).
7. Наличие режима полного и обзорного отображения структуры, состояний и процесса функционирования системы.
8. Реализация на доступных и наиболее распространенных технических и программных средствах.

Принципиальные решения.

Структура ЭС представлена на рисунке.



Основой ЭС является база знаний (БЗ). Из множества известных способов представления знаний (фреймы, семантические сети, исчисление предикатов, матрица примеров) был выбран продукционный способ, т.е. основанный на правилах, как наиболее естественный для восприятия (соответствие требованиям по пп. 1,7). БЗ состоит из базы правил (БП) и базы данных (БД).

Каждое правило БП может содержать до 5 условий, снабжается коэффициентом достоверности и приоритетом (пп. 2,3). При этом, как в условной (антецеденте), так и в констатирующей (консеквенте) части правила могут использоваться вычисления по формулам (п.4). Количество правил ограничивается только наличием свободной памяти.

БД или рабочая память содержит исходные и полученные значения факторов, т.е. факты, а так же список непроинициализированных факторов, имеющих в правилах. Значения, как и правила, снабжаются коэффициентами достоверности, а численные — дополнительно параметрами закона распределения (п.2).

В механизме логического вывода (МВ) используется монотонный вывод в ширину, т.е. правила не меняются, факты из БЗ не удаляются, вначале просматриваются все правила на одном уровне без углубления на сработавшем, затем на другом уровне и т.д.

Коэффициент достоверности каждого заключения рассчитывается по коэффициентам участвующих факторов и самого правила. При этом можно выбрать одно из 4-х правил: меньше меньшего (простая вероятность или ф.Байеса), по меньшему (логическое пересечение), по большему (логическое объединение), больше большего (теория достоверности Демпстера-Шейфера).

Механизм вывода может работать в 4-х режимах: прямая цепочка рассуждений (от фактов к цели); обратная цепочка рассуждений (от гипотезы к подтверждающим фактам); прямая с верификацией (с подтверждением); прямая со статистикой (с определением вероятностей различных результатов).

Вывод с верификацией предусматривает поиск альтернативных цепочек рассуждения, ведущих к тому же результату. Решается обычная прямая задача, осуществляется переключение на обратную с блокированием уже сработавших правил последовательно на первом, втором и т.д. уровнях.

Вывод со статистикой предусматривает многократный вывод с изменением факторов по заданному случайному закону и определение вероятностей возможных исходов результата (метод Монте-Карло).

В учебной программе важное место занимает средство общения (СО) и интерфейс пользователя. В идеале СО интеллектуальной системы должно включать речевой ввод, синтезатор речи, систему распознавания и грамматического разбора рукописного текста и т.п. Для практических ЭС это пока не-

реально и противоречит п.8 требований. Поэтому СО оболочки решена традиционными и общепринятыми средствами графического интерфейса. Подсистема приобретения знаний (ППЗ) состоит из подсистемы ввода знаний (ВЗ), т.е. интерфейса эксперта, и подсистемы обучения (ОЗ). Интерфейс решен теми же средствами и из тех же соображений, что и СО. Он представляет собой диалоговый ввод и редактор БД и БП с элементами тестирования на непротиворечивость.

Для подсистемы обучения из нескольких возможных способов обучения (обобщением опыта, по аналогии, стратегическое) был выбран наиболее простой и понятный — заучиванием (п.7,8).

Выведенные заключения по согласованию с экспертом или пользователем автоматически оформляются в виде правил и включаются в БЗ. Подсистема объяснения (ПО) предназначена для внушения доверия к результату и для вскрытия механизма вывода. Она отвечает на вопросы «как» и «почему», т.е. как получен результат и почему запрашиваются те или иные данные (п.7). Для этого оболочка располагает следующими средствами:

- постоянное графическое отображение на экране состояния ЭС и иллюстрация процесса вывода мультипликацией;
- строка сообщений — пояснения по содержанию выполняемого этапа или операции, смыслу и причине задаваемого вопроса;
- распечатка протокола с исходными данными, последовательностью сработавших правил, запрашиваемыми и выведенными фактами, промежуточными и окончательными результатами.

Программная реализация.

Оболочка реализована в среде Pascal с использованием принципов объектно-ориентированного программирования. Такое решение было продиктовано необходимостью унификации и «стыковки» оболочки с другими созданными на кафедре учебными программами (п.5,8).

ЭС работает в 2-х режимах: приобретение знаний (создание экспертом); консультации (эксплуатация пользователем).

Работа диспетчера вывода заключений визуализируется мультипликацией. В любой момент процесс вывода и его отображение может быть приостановлен для анализа.

Пример использования.

Оболочка была использована для создания ЭС «ManufSys», рекомендуемой целесообразный тип производственной системы. ЭС применяется в качестве лабораторной работы, при курсовом и дипломном проектировании.

ЭС рекомендует тип станочного оборудования и один из 8 возможных вариантов производственной системы:

- участок универсальных станков с ручным управлением;
- участок одноцелевых станков с ЧПУ;
- участок обрабатывающих центров;
- участок автономных модулей;
- гибкий автоматизированный участок;
- гибкая автоматизированная линия;
- переналаживаемая автоматическая линия;
- автоматическая линия.

ЭС учитывает следующие факторы: обрабатываемость материала и технологичность конструкции детали, средний размер партии запуска, годовая программа выпуска, номенклатура, время обработки и переналадки.

Эффективность.

Использование нескольких ЭС в учебном процессе более трех лет показало их эффективность. Они надежно выдают проектные решения с учетом качества исходных данных и специфичных условий. Работа с ЭС не вызывает никаких затруднений у неподготовленного пользователя. Результаты интерпретируются однозначно. Значительно возрастает интерес студентов к занятию и удовлетворение от самостоятельного применения современных информационных технологий.

Был достигнут и ожидаемый обучающий эффект в области самого искусственного интеллекта.

Вместе с тем, вскрылись и отрицательные моменты в применении ЭС. Во-первых, при обучении в предметной области ЭС делает всю работу за студента автоматически. И хотя при этом ЭС достаточно наглядно отражает, чем она руководствовалась, такое пассивное восприятие материала приводит к плохому его усвоению. Быстро получив готовый результат, студенту психологически трудно проходить путь повторно и вникать в логику получения этого уже известного результата.

Во-вторых, база знаний любой более-менее адекватной, т.е. профессиональной, ЭС становится очень громоздкой и плохо обозримой. При этом резко падает уровень восприятия и понимания предметной области.

Выводы.

1. Опыт использования искусственного интеллекта в учебном процессе показал его эффективность. Он позволяет повысить интенсивность обучения, степень усвоения материала и заинтересованность студентов.

2. Нецелесообразно предоставлять студенту для работы уже готовую ЭС. Базу знаний он должен формировать и заполнять самостоятельно.

3. Профессиональные ЭС для учебного процесса не годятся. Необходима их упрощенная модификация, но с обязательным указанием, в чем это упрощение заключается.

УДК 621.313.333

ВЕКТОРНОЕ УПРАВЛЕНИЕ АСИНХРОННЫМ ПРИВОДОМ ТРОЛЛЕЙБУСА

Симонович А. В., Петренко Ю. Н.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

Использование асинхронного привода в качестве тягового привода является перспективным направлением развития городского электротранспорта [1]. Создание тягового асинхронного привода имеет ряд особенностей, влияющих на синтез системы управления.

При синтезе системы управления возникает вопрос о том, какими координатами необходимо управлять. Большинство промышленных электроприводов управляет скоростью электродвигателя. Если рассмотреть систему регулирования скорости применительно к тяговому электроприводу, то получение постоянной скорости при заданном положении педали хода является достаточно удобным для водителя. Это свойство можно отнести к преимуществу данной системы. Но у нее есть и множество недостатков, вызванных особенностями тягового привода:

1) большой диапазон изменения статического момента приводит к тому, что при большом статическом моменте момента двигателя не хватает для того, чтобы получить максимальную скорость. То есть скорость транспортного средства будет меньше заданной. Причем реальная скорость может быть меньше заданной в два раза. Такую систему уже нельзя назвать системой стабилизации скорости. Чтобы избежать этого недостатка, придется повышать мощность двигателя, что нерационально;

2) переменный момент инерции (изменяется в два раза) и сложность его определения приводит к тому, что не удастся получить оптимальную настройку привода во всех режимах работы;

3) в системе стабилизации скорости наезд транспортного средства на препятствие приведет к броску момента, то есть удару по мосту;

4) вызывает сложность реализация режима выбега. Отпускание педали хода в системе стабилизации скорости приведет к остановке транспортного средства, т.к. задание скорости станет равным нулю. В действительности транспортное средство должно продолжать движение по инерции.

К тому же все существующие системы тягового привода городского электротранспорта с двигателями постоянного тока последовательного или смешанного возбуждения являются системами регулирования момента. Из все-

го вышесказанного следует, что для тягового привода предпочтительней является использование системы регулирования момента.

Помимо этого следует отметить отсутствие жестких требований к точности поддержания скорости; наличие частых включений — выключений привода; наличие частых пусков — торможений. Важным является формирование мягкой тяговой характеристики привода [2], которая в приводе постоянного тока формировалась за счет механических характеристик самого двигателя, а в асинхронном приводе она должна формироваться системой управления.

На рис. 1 представлена общая структура предлагаемой системы векторного управления тягового асинхронного привода. Система управления построена на основе модели асинхронного двигателя (АД) в осях X, Y. Исходные уравнения АД для синтеза системы управления и наблюдателя выглядят так:

$$i_{1x} = \frac{1}{R_3 \left(\frac{L_3}{R_3} p + 1 \right)} \left(U_{1x} + R_2 \frac{L_{12}}{L_2} \Psi_{2x} + \omega_{03л} L_3 i_{1y} \right), \quad (1)$$

$$i_{1y} = \frac{1}{R_1 \left(\frac{L_2}{R_1} p + 1 \right)} \left(U_{1y} - \omega_{03л} L_3 i_{1x} - \omega_{03л} \frac{L_{12}}{L_2} \Psi_{2x} \right), \quad (2)$$

$$\Psi_{2x} = \frac{L_{12}}{\left(\frac{L_2}{R_2} p + 1 \right)} \cdot i_{1x}, \quad (3)$$

$$M = \frac{3L_{12}}{2L_2} p i_{1y} \Psi_{2x} = K_M i_{1y} \Psi_{2x}, \quad (4)$$

$$\omega_{03л} = \omega_{3л} + R_2 \frac{L_{12}}{L_2} \frac{i_{1y}}{\Psi_{2x}} = \omega_{3л} + \Delta \omega, \quad (5)$$

$$R_3 = R_1 + R_2 \frac{L_{12}^2}{L_2^2} \quad L_3 = \frac{L_1 L_2 - L_{12}^2}{L_2}$$

где U_{1x} , U_{1y} — проекции напряжений статора на оси X, Y; i_{1x} , i_{1y} — проекции токов статора и ротора на оси X, Y; $\omega_{03л}$, $\omega_{3л}$ — скорость вращения поля статора и ротора; R_1 , R_2 — сопротивление обмотки статора и ротора соответственно; Ψ_{2x} — проекция потокосцепления ротора на ось X; L_1 , L_2 , L_{12} — полная эквивалентная индуктивность фазы статора и ротора и индуктивность взаимной индукции.

В схеме приняты следующие обозначения:

ПК1...ПК4 — преобразователи координат; БФП — блок формирования потока; РП — регулятор потока; РТХ — регулятор тока по оси X; ЗИМ — задачик интенсивности момента; БОМ — блок ограничения момента; РТУ — регулятор тока по оси Y; ДТ — датчики тока; ВВ1 — датчик скорости; $K_{от}$

— коэффициент обратной связи по току; U_{α}, U_{β} — напряжения по осям α, β ; I_{α}, I_{β} — токи по осям α, β ; U_x, U_y — напряжения по осям X, Y ; I_x, I_y — токи по осям X, Y ; Ω — скорость двигателя; $\Omega_{\text{эл}}$ — скорость поля ротора; $\Omega_{0\text{эл}}$ — скорость поля статора; F_2 — поток ротора; F_3 — заданный поток ротора; M_3 — заданный момент двигателя.

Мы получаем два контура регулирования тока статора I_x и I_y и контур регулирования потока ротора Ψ_{2x} . При $\Psi_{2x} = \text{const}$ момент двигателя прямо пропорционален току статора по оси Y . В систему поступают сигналы обратных связей по токам I_A, I_B и сигнал с датчика скорости. Помимо использования сигнала обратной связи по скорости в системе управления, применение датчика скорости продиктовано и требованиями безопасности транспортного средства. Блок ограничения момента формирует ограничение момента в зависимости от скорости, т. е. мягкую характеристику привода. Блок формирования потока обеспечивает снижение задания потока при регулировании скорости вверх от номинальной. В системе задается момент двигателя и поток ротора [2].

Моделирование предложенной системы управления выполнено в среде MATLAB с использованием пакета SIMULINK. Преобразователь при моделировании учтен упрощенно в виде апериодических звеньев в каждом канале регулирования. Результаты моделирования пуска привода троллейбуса представлены на рис. 2.

Из приведенных графиков видно, что пуск троллейбуса со статическим моментом $M_C = 0,3M_{\text{ном}}$ и заданным пусковым моментом $M_{\text{зад}} = 1,6M_{\text{ном}}$ происходит примерно за 15 с. При этом переходный процесс можно разделить на пять характерных участков. На первом участке идет формирование потока ротора. На втором участке идет пуск с заданным нарастанием момента и с постоянным потоком. На третьем участке происходит разгон с постоянным потоком и моментом двигателя до номинальной скорости. На четвертом участке двигатель уже достиг номинальной скорости и дальнейший разгон возможен только при снижении потока. Но двигатель при этом еще не вышел на предельную характеристику по моменту, поэтому удается поддерживать постоянный момент за счет увеличения тока по оси X . На пятом участке момент двигателя достигает предельного значения, и дальнейший разгон происходит с поддержанием постоянства мощности.

На основании полученных результатов можно сделать вывод, что система векторного управления тяговым асинхронным приводом позволяет получить необходимые динамические характеристики и удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к тяговому приводу.

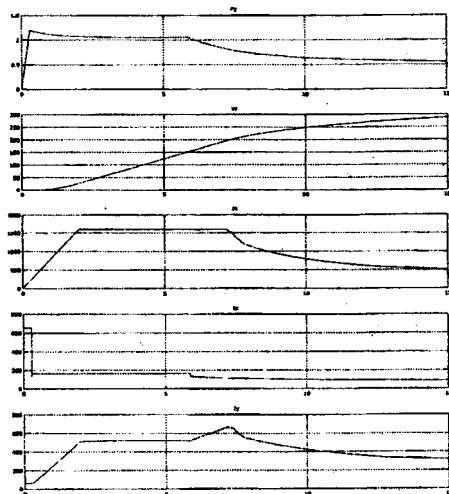


Рис.2 Переходные процессы в асинхронном приводе троллейбуса

Литература:

1. Имитационная модель автоматизированного привода троллейбуса. Петренко Ю. Н., Симонович А. В. // Материалы 3-й международной научно-технической конференции СИМ*2002. — Мн.: ОИПИ НАН Беларуси, 2002. — С. 120–121.
2. Перспективы развития систем управления троллейбусов. Симонович А. В., Петренко Ю. Н. // Энергетика. — 2003. — №1. — С. 24–28
3. Теория и расчет тягового привода электромобилей. Под ред. И. С. Ефремова. — М.: «Высшая школа», 1984.

ТРАНСПОРТ

ПРОГНОЗНОЕ ВЫЯВЛЕНИЕ УПРАВЛЯЕМЫХ ПАРАМЕТРОВ ГРМ ДВС

Брянч М.П., Буренков Д.О.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

В современных автотракторных двигателях основные параметры механизмов и систем подбираются с учетом удовлетворения требований к номинальному режиму работы двигателя. Фиксированные по этому режиму параметры и алгоритмы функционирования не обеспечивают оптимальных условий работы узлов на других режимах по частоте вращения коленвала и нагрузке двигателя. В связи с этим возникает задача выявления управляемых параметров функциональных элементов двигателя, создания для управления ими автоматических устройств и обеспечения, таким образом, оптимальных результатов работы двигателя в заданном диапазоне режимов.

В настоящей работе излагается возможность предпроектного прогнозного выявления управляемых параметров газораспределительного механизма (ГРМ) двигателя внутреннего сгорания (ДВС). Основное функциональное назначение ГРМ- организация газообмена в надпоршневом пространстве ДВС. Оно заключается в своевременной подаче порции свежего заряда и своевременном удалении отработавших газов (ОГ). ГРМ можно отнести к синхронным механическим распределителям с непрерывным периодическим переключением цепей. Переключаемые цепи: впускной тракт — цилиндр, цилиндр — выпускной тракт. Характер функционирования ГРМ — циклический или ритмический (с заданным тактом). Имеющиеся исследования утверждают, что автоматизация таких процессов наиболее проста и эффективна (1).

Возможные направления автоматизации ГРМ определим с использованием критериального анализа функционирования ГРМ. Для оценки функционирования ГРМ принимаем следующие описательные критерии: 1) своевременность функционального воздействия определяемую наличием временного несоответствия между фактическим и технически целесообразным началом или концом функционирования узла; 2) соответствие фактического количественного функционального результата оптимальному по техническим условиям, что можно оценить весовым наполнением цилиндра; 3) соответствие полученных характеристик качества функционального результата оптимальным по техническим условиям, что оценим коэффициентом наполнения; 4) интегрированное влия-

яние отклонений характеристик узла по указанным критериям качества на выходные показатели двигателя.

В качестве объекта для дальнейших рассуждений принимаем широко известную схему клапанного ГРМ с механическим приводом применительно к 4-тактному дизельному ДВС. Для анализа функционирования ГРМ используем также информационную модель ГРМ, представленную на рис. 1.

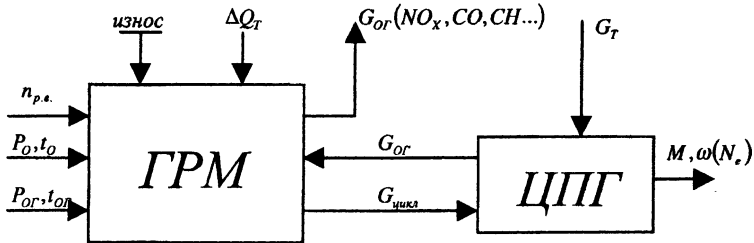


Рис. 1. Информационная модель функционирования ГРМ

где $n_{p.s.}$ — частота вращения распределительного вала;

$P_{o_1}, t_{o_1}, P_{o_2}, t_{o_2}$ — давление и температура воздуха на впуске и отработавших газов;

ΔQ_T — тепловое воздействие двигателя на конструктивные элементы ГРМ;

$G_{цикл}$ — расход воздуха на впуске за цикл;

G_{or} — расход отработавших газов на выпуске;

G_T — расход топлива за цикл;

M, ω — крутящий момент, угловая скорость коленвала на выходе из двигателя;

ЦПГ — цилиндро-поршневая группа;

ИЗНОС — износные явления в контактных парах, как возмущающее воздействие на кинематику ГРМ.

Проанализируем функционирование ГРМ за время одного цикла теплового двигателя на основе принятых критериев.

Своевременность переключения цепей за счет циклического открытия клапанов в зависимости от угла поворота коленвала в заданной схеме ГРМ обеспечивается кинематикой механизма. Точность функционирования ГРМ будет нарушаться при изменении зазора между торцом клапана и носиком коромысла. Возмущающими воздействиями в данном случае являются тепловое воздействие на элементы ГРМ и износ посадочной фаски седла выпускного клапана. Отсюда следует необходимость автоматического регулирования вышеуказанного зазора.

Весовое наполнение цилиндра будет зависеть от расхода воздуха через клапан, который определяется выражением (2)

$$G_{ВП} = \rho_B * W_B * \int_{t_1}^{t_2} f dt = \rho_B * W_B * \frac{1}{6n} * \int_0^{\Phi} f d\phi$$

где ρ_B — плотность воздуха,

W_B — скорость воздуха в минимальном поперечном сечении клапанной щели,

n — частота вращения коленвала,

f — величина проходного сечения клапана в рассматриваемый момент времени,

Φ — угол поворота коленвала,

ϕ — угол действия клапана,

$\int f dt$ — «время-сечение» клапана.

t_1 Расход воздуха на впуске за цикл $G_{цикл} = k * G_e$ где k — коэффициент, учитывающий дозарядку цилиндра за счет инерционности потока на впуске.

Формулы показывают, что с увеличением частоты вращения коленвала время-сечение клапана уменьшается. Это ведет к уменьшению наполнения и ухудшению условий сгорания. Последнее может оказывать влияние на токсичность ОГ. Отсюда следует, что с изменением частоты вращения необходимо влиять на параметр «время-сечение», на угол действия клапана. Это возможно сделать за счет автоматического управления фазами газораспределения, а также за счет изменения проходного сечения клапана. Управление фазами газораспределения позволит оптимально учитывать эффект инерционности и волновые явления в потоке воздуха на впуске. Влияние фаз газораспределения на токсичность ОГ подтверждается экспериментальными данными (3).

Анализ экспериментальных данных, полученных разными авторами(2,3), показывает, что управление фазами газораспределения влияет на коэффициент наполнения, характеризующий качество функционирования ГРМ. Наибольшее влияние на коэффициент наполнения оказывает момент конца закрытия впускного клапана, причем каждой частоте вращения двигателя соответствует свой оптимальный момент закрытия.

Интегрированное рассмотрение критериев оценки функционирования ГРМ показывает, те технические решения, возникающие при анализе критериев, порознь самостоятельны и в тоже время дополняют друг друга.

Вывод.

Критериальный анализ функционирования ГРМ подтверждает необходимость автоматического регулирования и управления параметра-

ми ГРМ. Полученные результаты прогнозного выявления управляемых параметров являются основанием для конструкторской разработки автоматических устройств, повышающих эффективность функционирования ГРМ.

Литературы:

1. Майзель М.М. Основы автоматики и автоматизации производственных процессов. —М.: «Высшая школа», 1964г. 579с.

2. Двигатели внутреннего сгорания: Теория поршневых и комбинированных двигателей. Под ред. Орлина А.С., Круглова М.Г. —М.: Машиностроение, 1983 г. 372с.

Марков В.А., Шатров В.И., Сиротин Е.А. Базовые характеристики управления параметрами дизелей. —Грузовик &, 2001, №12, с.27–36

УДК 621.892.096.1

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОЧИСТКИ МОТОРНОГО МАСЛА ОТ ЗАГРЯЗНЕНИЙ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИМ ОЧИСТИТЕЛЕМ

Хитрюк В.А., Логвинова Е.Н.

*Белорусская государственная сельскохозяйственная академия
Горки, Беларусь*

В структуре всех затрат на эксплуатацию машинно-тракторного парка затраты на нефтепродукты составляют примерно одну треть. В условиях Республики Беларусь, с ограниченными возможностями поставки моторных масел для регламентированной замены, большое значение имеет решение задач продления их срока службы.

Современные моторные масла имеют значительный запас трибохимических свойств за счет применения высокоэффективных многофункциональных присадок. Эти свойства, по данным многочисленных исследований, поддерживаются на должном уровне в результате регулярного долива, компенсирующего расход на угар и неконтролируемые утечки.

Применяемые на автотракторных двигателях разнообразные очистители и их комбинации отделяют большую часть опасных абразивных загрязнений и продуктов старения масла. Вместе с тем, масло, сливаемое при регламентном обслуживании, используется крайне нерационально.

Нами предложена очистка отработанного моторного масла от продуктов износа, абразивных загрязнений, продуктов старения применением электростатического фильтра.

Принцип работы такого очистителя основан на притягивании к электродам частиц, обладающих электрическим зарядом, независимо от их свойств и происхождения (железо, цветные металлы, кварц, углерод и т.п.). Частицы получают электрический заряд в результате трения о жидкость. По известному правилу Кена частицы загрязнений, имеющие большую диэлектрическую проницаемость, заряжаются положительно.

В очиститель поступают загрязнения широкого фракционного состава. Характеристикой их полидисперсности является дифференциальная функция $F(di)$ распределения загрязнений по размерам. Максимуму данной функции соответствует вероятнейший диаметр загрязнений db , а точка ее пересечения с осью абсцисс — наибольший d_{max} и наименьший d_{min} диаметры. Объем загрязнений V_0 , поступивших с маслом в очиститель, равен сумме объемов всех содержащихся в масле загрязнений [1].

$$V_0 = \frac{1}{6} \pi \sum_{d_{min}}^{d_{max}} F(d_i) d_i^3, \quad (1)$$

где d_i — диаметр загрязнений, м; $F(d_i)$ — доля загрязнений диаметра d_i .

В очистителе задерживаются все загрязнения, размером больше некоторого граничного диаметра d_{gr} . Задержанный очистителем объем загрязнений определяется следующим образом

$$V_1 = \frac{1}{6} \pi \left[\sum_{d_{min}}^{d_{gr}} F(d_i) n(d_i) d_i^3 + \sum_{d_{gr}}^{d_{max}} F(d_i) d_i^3 \right], \quad (2)$$

где $n(d_i)$ — доля задержанных очистителем загрязнений диаметром d_i .

Доля загрязнений любого диаметра, задержанных очистителем, определяется отношением действительной скорости частицы в очистителе к скорости, необходимой для осаждения

$$n(d_i) = \frac{v_1}{v_2}, \quad (3)$$

где \bar{v}_1 — действительная скорость частицы загрязнения в очистителе, м/с; \bar{v}_2 — скорость, необходимая для осаждения частицы, м/с.

Допустим, что при равенстве сил загрязнение находится в состоянии покоя относительно масла и его скорость определяется скоростью потока, проходящего через очиститель. Принимая движение масла в очистителе ламинарным, а площадь поперечного сечения очистителя постоянной по всей длине, необходимую для осаждения скорость загрязнения можно определить следующим образом

$$\bar{\delta}_2 = \bar{\delta}_3 = \frac{Q}{BZ\bar{\rho}_y}, \quad (4)$$

где $\bar{\delta}_3$ — скорость потока масла через очиститель, м/с;
 Q — расчетный расход масла через очиститель, кг/с;
 B — ширина электрода, м;
 Z — расстояние между электродами, м;
 $\bar{\rho}_y$ — плотность масла, кг/м³.

Исходя из первого закона Ньютона, загрязнение будет находиться в покое или двигаться прямолинейно и равномерно, если сумма внешних сил, действующих на него в электростатическом поле, равна нулю

$$F_1 + F_2 + F_3 + F_4 + F_5 + F_6 = 0, \quad (5)$$

где F_1 — сила инерции загрязнения;

F_2 — сила Архимеда;

F_3 — сила сопротивления движению загрязнения в вязкой среде;

F_4 — сила тяжести;

F_5 — пондеромоторная сила электростатического поля, возникающая из-за разности диэлектрической проницаемости загрязнения и масла и направленная в сторону увеличения напряженности поля;

F_6 — сила Кулона.

Спроецируем силы, действующие на загрязнение (рис.). Проекция сил на ось Y , направленную в сторону движения потока масла, описывается уравнением

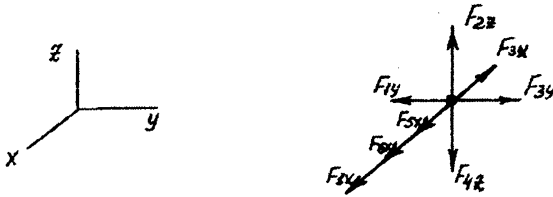


Рис. Схема сил, действующих на частицу загрязнения в электростатическом поле.

$$F_{1y} = F_{3y}, \quad (6)$$

Подставив значения сил, рассчитанных по формулам Осеена и Ньютона [2], и упростив выражение, получим уравнение

$$\frac{dv_y}{dt} + bv_y + cv_y^2 = 0, \quad (7)$$

где b, c — коэффициенты, определяемые по формулам

$$b = -\frac{18\mu_1}{d_i^2 \rho_2}, c = -\frac{27\rho_1}{8d_i^2 \rho_2},$$

где μ_1 — динамическая вязкость масла, Па·с;

ρ_2 — плотность загрязнения, кг/м³.

Дифференциальное уравнение (7) имеет решение вида

$$v_y = \frac{b}{c(e^{(t+p)b} - 1)}$$

где p — постоянная интегрирования.

Постоянную интегрирования можно определить, исходя из граничных условий. Предположим, что в момент времени $t = 0$, когда загрязнение попадает в межэлектродное пространство, проекция скорости на ось Y относительно потока масла равна нулю. Тогда постоянная интегрирования равна нулю. Следовательно

$$v_y = \frac{b}{c(e^{tb} - 1)}, \quad (8)$$

Проекция сил на ось X , совпадающую по направлению с силовыми линиями электростатического поля, описывается уравнением

$$F3X = F5X + F6X + F1X, \quad (9)$$

Подставив значения данных сил и упростив выражение, получим дифференциальное уравнение

$$\frac{dv_y}{dt} + bv_y + cv_y^2 - j = 0, \quad (10)$$

где j — коэффициент, определяемый по формуле

Дифференциальное уравнение (10) имеет решение следующего вида [1]

$$v_x = \frac{e^{(t+p)x}(x-b) + x + b}{2c(e^{(t+p)x} - 1)}, \quad (11)$$

где pi — постоянная интегрирования; x — коэффициент, определяемый следующим образом $x = \sqrt{b^2 + cj}$.

Постоянную интегрирования определим исходя из граничных условий. В момент времени $t=0$ проекция скорости загрязнения относительно потока масла на ось X равна скорости его осаждения под действием силы тяжести, которая определяется по закону Стокса

$$v_0 = \frac{d_i^2}{18} (\gamma_1 - \gamma_2) \frac{1}{\eta}, \quad (12)$$

где v_0 — скорость осаждения частицы загрязнения, м/с;

γ_1 — удельный вес загрязнения, Н/м³;

γ_2 — удельный вес масла, Н/м³;

η — абсолютная вязкость, Н/м³.

Тогда постоянная интегрирования определяется по зависимости

$$P = \frac{\ln \left[\frac{x+b+2cv_0}{x-b-2cv_0} \right]}{x}, \quad (13)$$

Спроецировав силы на ось Z, направленную вертикально, видим, что сила Архимеда F_{2z} равна силе тяжести F_{4z} , следовательно загрязнение находится во взвешенном состоянии и не движется относительно оси Z. Выражения (11) и (8) позволяют получить зависимости мгновенной скорости загрязнения от его размера, местоположения в межэлектродном пространстве, расстояния между электродами и приложенного к ним напряжения.

Зная скорость движения загрязнения, можно определить долю загрязнений любого диаметра, которая будет задержана в фильтре, и тем самым вычислить коэффициент эффективности

$$K = \frac{W_0 - W_1}{W_0},$$

где W_0 — начальная объемная концентрация загрязнений в масле;

W_1 — объемная концентрация загрязнений после очистителя.

Таким образом, полученные формулы представляют математическую модель зависимости эффективности очистки масла электростатическим очистителем от его основных параметров и характера поступающих загрязнений.

Литература:

1. Грановский М.П., Лавров И.С., Смирнов О.В. Электрообработка жидкостей. Л.: Химия, 1979.

2. Фукс Н. А. Механика аэрозолей. М.: Изд. АН СССР, 1955.

3. Математические методы решения физических задач /В. В. Харитонов, Д. Г. Лин, В. А. Пенязь и др.; Под. общ.ред. В. В. Харитонова. — Мн.: Выш.шк., 1991.

УДК 629.4.016.2

О НОРМИРОВАНИИ РАСХОДА ДИЗЕЛЬНОГО ТОПЛИВА МАГИСТРАЛЬНЫМИ ТЕПЛОВОЗАМИ

Френкель С.Я.

*Белорусский государственный университет транспорта
Гомель, Беларусь*

Количество топлива, израсходованного тепловозом на перемещение состава по участку, зависит от многих факторов. Среди них особо следует выделить эксплуатационные факторы, величина и характер которых изменяются в процессе осуществления перевозочного процесса, что определяет их влияние на расход топлива тепловозами.

Эксплуатационные факторы, определяющие расход энергоресурсов на тягу поездов можно разделить на две большие группы: *качественные* и *количественные*.

К *качественным* следует отнести факторы, которые нельзя или достаточно сложно измерить. Например, машинист или локомотив, модифицированное топливо или система управления локомотивом.

К *количественным* относят такие факторы, как тоннокилометровая работа, масса состава и средняя осевая нагрузка, техническая и участковая скорость движения и др.

Подход к исследованию влияния эксплуатационных факторов на расход энергоресурсов должен быть различным для каждой из названных групп.

Традиционно исследование влияния эксплуатационных факторов на расход топлива (электроэнергии) выполняют либо экспериментальным путем, либо с помощью моделирования движения поезда, опирающегося на положения теории локомотивной тяги и, нередко, теории оптимального управления. Каждое из направлений имеет как достоинства, так и недостатки.

Получение экспериментальных данных с помощью тягово-энергетических испытаний не только трудоемко, но требует дополнительных затрат на топливо. В то же время много ценной информации содержится в маршрутных листах машинистов.

Система интегрированной обработки маршрутов машиниста (ИОММ), применяемая на Белорусской железной дороге, позволяет хранить информацию о поездках на электронных носителях. Однако форма представления информации не позволяет использовать для ее обработки современные средства математического обеспечения. Аспирантом Б.С. Френкелем разработана программа обработки текстовых файлов, сформированных программным обеспечением системы ИОММ, которая позволяет представить всю информацию из маршрутов машиниста в виде базы данных формата Microsoft Access. Представление в дальнейшем информации о каждой поездке в виде одной строки позволило выполнять исследования средствами Microsoft Excel.

Данные, полученные из маршрутных листов, подвергаются предварительной обработке, которая необходима для того, чтобы в дальнейшем с наибольшей эффективностью, а главное — корректно, использовать для построения эмпирических зависимостей статистические методы. Содержание предварительной обработки в основном состоит в отсеивании грубых погрешностей, неизбежно имеющих место при заполнении маршрутных листов и вводе информации в ЭВМ.

Для того чтобы получить представление о порядке значений исследуемых величин и характере их изменения, построены гистограммы распределения исследуемых величин и их поля рассеяния.

Построены поля рассеяния зависимых переменных (полного V_T и удельного расхода топлива, приходящегося на единицу перевозочной работы - e_T) от величин, которые предположительно влияют на e_T . Такими независимыми переменными, например, в грузовом движении являются масса состава Q , пробег S , тоннокилометровая работа QS , техническая скорость v_T , участковая скорость v_y , число остановок за поездку $N_{ост}$, число осей в поезде n_0 и осевая нагрузка q_0 .

Анализ полей рассеяния, построенных для грузовых поездов, показывает, что наиболее сильное влияние на расход топлива оказывают такие факторы, как работа, осевая нагрузка, масса состава, пробег.

Зависимости $V_\phi = f(QS)$, $V_\phi = f(Q)$ и $V_\phi = f(q_0)$ близки к линейным, хотя $V_\phi = f(Q)$ и $V_\phi = f(q_0)$ вследствие разной длины плеч обслуживания, а также вследствие влияния и других факторов имеют довольно широкий разброс точек. Отклонения отдельных точек от основной их массы, определяющей характер зависимости, объясняется влиянием отдельных неучтенных факторов.

На остальных полях рассеяния закономерности, которым подчиняется основная масса точек, выражены значительно слабее. Это говорит о влиянии на зависимые переменные других, более сильных факторов, либо об отсутствии какой-либо связи между фактором и откликом на него.

Аналогичные исследования, выполненные для пассажирского и пригородного движения, в основном подтверждают закономерности, выявленные для грузового движения.

В практике энергетических расчетов, связанных с движением поездов, находят все более широкое применение статистические методы прогнозирования расхода топлива на тягу поездов, позволяющие количественно оценить влияние каждого случайного фактора, изменяющегося от поездки к поездке, на расход топлива. Сущность названного подхода состоит в определении корреляционных связей между значением расхода топлива и случайными значениями факторов, его определяющих в виде уравнения регрессии

$$e = a_0 + \sum_1^n a_i x_i .$$

Значения коэффициентов корреляции a_0, a_1, \dots, a_n определяют обычно методом наименьших квадратов.

Исходными данными для составления уравнения регрессии служат данные о поездках из маршрутных листов, в которых зафиксированы значения расхода топлива и факторов x_1, x_2, \dots, x_n . В качестве факторов x_i обычно рассматривают массу состава, среднюю нагрузку на ось вагона, техническую и участковую скорость движения и др.

После предварительного анализа эксплуатационных факторов, влияющих на расход топлива тепловозами, были определены уравнения регрессии, позволяющие предсказывать расход дизельного топлива тепловозами.

Обработка данных о расходе топлива и построение регрессионных моделей выполнены с использованием пакета программ для статистической обработки данных STATGRAPHICS Plus for Windows и табличного процессора Microsoft Excel.

Очевидно, что полученные уравнения регрессии можно использовать для нормирования расхода топлива на поездку. При этом за норму принимается некоторая среднестатистическая поездка. Число поездок с перерасходом и с экономией топлива в этом случае оказывается примерно равным. Если, как это принято думать, на расход топлива существенное влияние оказывает машинист и техническое состояние локомотива, то по отклонению от нормы расхода топлива можно выявлять как лучших, так и худших. Объективность нормирования, а следовательно и оценки качества работы машиниста и локомотива дает возможность реализации адресных эффективных решений, направленных на снижения расхода топлива. Однако значимость таких факторов, как локомотив и машинист требует доказательства. С задачей оценки значимости названных выше факторов тесно связан вопрос оценки способа нормирования расхода топлива на поездку. Как оценить, насколько объективна система нормирова-

ния, насколько она позволяет выявлять машинистов (локомотивы) экономящих или перерасходующих дизельное топливо?

Для ответа на эти вопросы целесообразно воспользоваться аппаратом дисперсионного анализа.

В качестве факторов, влияние которых на расход топлива предстоит определить, будем рассматривать машинистов либо локомотивы. Исследовать влияние каждого из названных факторов будем поочередно.

В соответствии с принятой терминологией в качестве исследуемого фактора можно принять расход топлива за поездку — полный, удельный или отклонение от нормы. Предпочтение следует отдать отклонению от нормы, поскольку в этом случае нейтрализуется влияние тех факторов, которые учитываются при расчете нормы расхода топлива. Более того, при исследовании оценивается также эффективность нормирования. Номера локомотивов или табельные номера машинистов назовем обработками. Наблюдаемый отклик (численное значение отклонения фактического расхода топлива за поездку от нормы) на каждую из обработок представляет собой случайную величину. Сформулированная задача является задачей однофакторного дисперсионного анализа.

Для исследования приняты данные о 1744 поездках машинистов локомотивного депо Гомель в грузовом движении. Тепловозы серии 2ТЭ10У. Из рассматриваемого массива данных для исследования значимости фактора машинист выбраны данные о 704 поездках 22-х машинистов. Не принимались в расчет данные о поездках тех машинистов, которых в рассматриваемом массиве оказалось менее 32.

Результаты дисперсионного анализа данных по отклонению от нормы расхода топлива, определяемой по действующей до настоящего времени методике показали, что гипотеза о том, что от конкретного машиниста (локомотива) не зависит отклонение фактического расхода топлива за поездку от нормы, подтверждается. Из этого следует, что либо действительно машинист или локомотив не является значимым фактором, либо используемая в исследовании система определения нормы расхода топлива на поездку не является объективной.

Для дальнейшего исследования в качестве нормы расхода топлива на поездку принят расход топлива, рассчитанный по регрессионной модели. В этом случае гипотеза о том, что от конкретного машиниста не зависит отклонение фактического расхода топлива за поездку от нормы, не принимается. Такой вывод подтверждает целесообразность нормирования расхода топлива на поездку и стимулирования топливосбережения машинистами.

Исследование значимости влияния локомотива на расход топлива за поездку также позволяет сделать вывод о значимости фактора «локомотив», а также о

том, что регрессионная модель значительно лучше учитывает особенности условий эксплуатации магистральных локомотивов. Причем, однажды составленная регрессионная модель расхода топлива остается пригодной для оценки квалификации машиниста и технического состояния локомотива на протяжении достаточно длительного периода (в рассмотренном нами случае более 4 лет).

Одновременно можно утверждать, что применяемая в настоящее время методика нормирования расхода топлива на поездку не позволяет адекватно оценивать ни квалификацию машиниста, ни техническое состояние локомотива, а, следовательно, не выполняет свою основную функцию.

Результаты исследования для пассажирского движения практически не отличаются от приведенных выше результатов, полученных для грузового движения.

УДК 621.892:621.793.3

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ СПОСОБА ВНЕСЕНИЯ СОСТАВЛЯЮЩИХ МЕТАЛЛОПЛАКИРУЮЩЕЙ ПРИСАДКИ ГРЕТЕРИН-3 ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ ПРИРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ АВТОТРАКТОРНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Брезгунов Г.В

*Белорусская государственная сельскохозяйственная академия
Горки, Беларусь*

Дополнительное введение в моторное масло металлоплакирующей (МП) присадки ведет к повышению срока службы автотракторных двигателей, при этом расход масла сокращается в 2...18 раз, дымление в 20...30 раз [1]. Улучшаются и другие параметры работы двигателя.

Для улучшения прирабатываемости деталей двигателей разработана МП присадка Гретерин-3 [2]. Состав присадки: медь хлорная ГОСТ 4167-74 — 3,7%; неонол АФ₃₋₆ ТУ 38.50724-87 — 11,0%; бутиловый спирт ГОСТ 5208-81 — 3,7%; олеиновая кислота ГОСТ 10475-75 — 74,0%; глицерин ГОСТ 6259-75 — остальное.

Для приготовления смазочной композиции используют специальное устройство (насос-мешалку), в котором происходит перемешивание моторного масла с прирабочным компонентом [3].

Детали цилиндно-поршневой группы (ЦПГ) прирабатываются более продолжительное время. При первоначальном пуске двигателя, а также при

прокручивании вала во время холодной обкатки, масло поступает к трущимся деталям через некоторый промежуток времени. Следовательно, первоначальная работа ЦПГ происходит без смазочного состава, что оказывает влияние на время приработки.

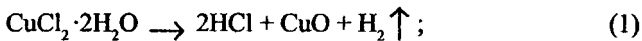
Предлагается внести составляющие прирабочного компонента Гретен-3 в два приема. Сначала выполняется финишная антифрикционная безабразивная обработка зеркала гильз цилиндров в технологической среде, содержащей глицерин и хлорную медь (используются компоненты 1 и 5), затем остальные составляющие (компоненты 2–4) вносятся в масло, которое используют для обкатки двигателя.

Рассмотрим химические процессы протекающие на поверхности зеркала гильзы цилиндров.

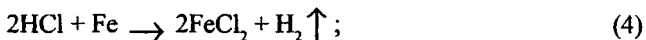
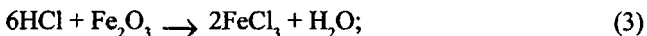
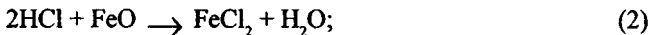
Металлы на воздухе подвергаются окислению. Скорость образования окисной пленки исчисляется долями секунды. Формирование покрытия происходит в несколько этапов на чугунной поверхности образуются различного вида слои: Fe_2O_3 , Fe_3O_4 , $(\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{FeO})$, FeO и Fe .

Глицерин хорошо впитывает влагу. Водный раствор глицерина, содержащий хлорид меди и при трении обладает МП свойствами, т.е. в результате трибохимических взаимодействий на трущихся поверхностях происходит образование твердосмазочных покрытий (ТСП).

Хлорид меди в зоне трения подвержен гидролизу, образуя соляную кислоту, оксид меди и водород формула (1).



Наличие небольшого количества кислоты способствует удалению окисных защитных слоев образуя на поверхности хлориды железа формулы (2–4).



Затем в результате механического взаимодействия происходит разрушение полученных пленок. Медь в силу электрофоретического движения переносится на очищенную ювенильную поверхность в зоне контакта. Образуя медное покрытие.

Имеющийся глицерин при трении разлагается на глицериновый альдегид, акролеин, формальдегид и глицериновую кислоту — продукты с меньшим, чем у глицерина молекулярным весом формулы (5–8).

Химические взаимодействия, протекающие в зоне трения, приводит к образованию ТСП, состоящего из осажденной меди и металлических мыл (поверхностно-активных веществ) формулы (9–15).

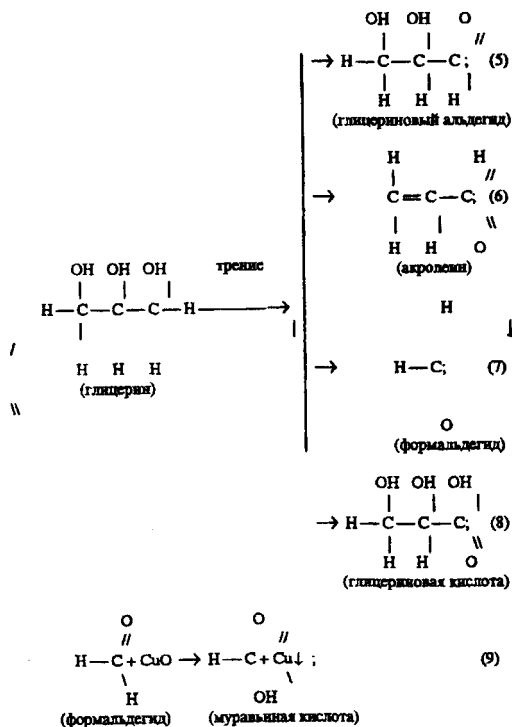
Одновременно, в результате трибоактивации происходит превращение высокомолекулярных соединений и полимеров трения — на трущихся поверхностях формируются защитные полимерные пленки формулы (16–18).

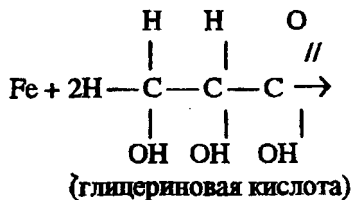
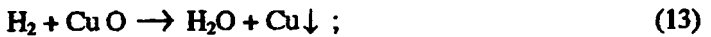
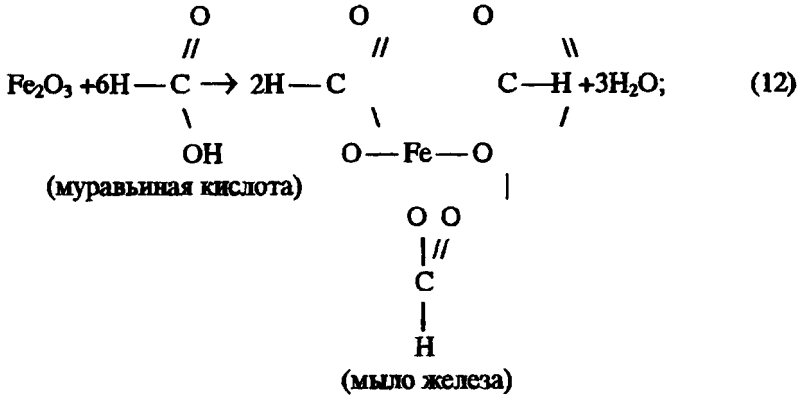
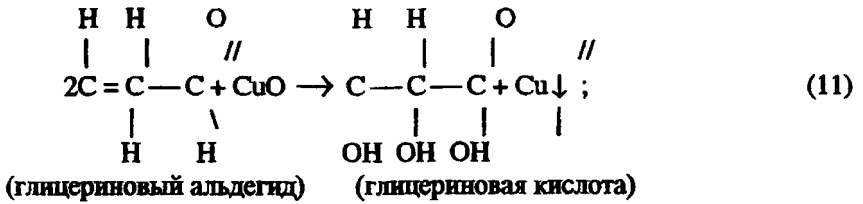
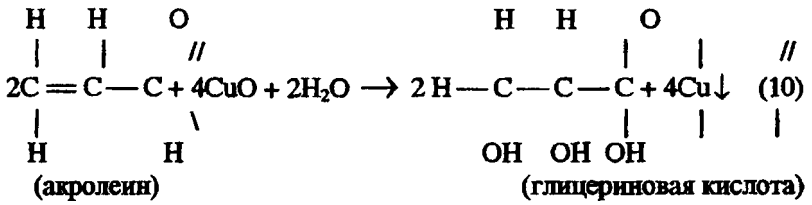
Толщина образуемого многослойного ТСП - 5...7 мкм.

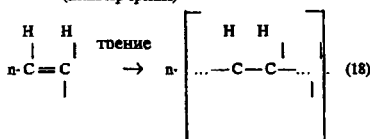
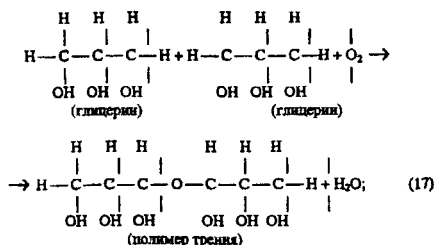
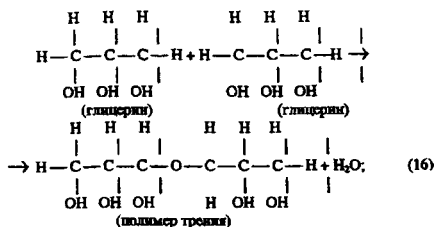
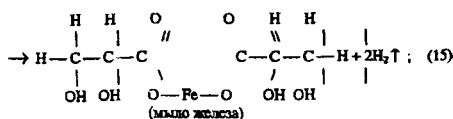
Внесенные перед обкаткой в моторное масло остальные составляющие присадки во время холодной обкатки перемешаются, тем самым получив смазочную композицию гритерин-3 в моторном масле.

Выводы:

1. Получаемое ТСП ускоряет приработку деталей ЦПГ







2. Предлагаемый технологический процесс исключает приготовление смазочной композиции в моторном масле..

3. Предлагаемый способ внесения МП присадки Гретерин-3 позволит повысить качество приработки деталей двигателей.

Литература

1. Гаевик Д.Т. Определение качества смазочных материалов и их пригодности для использования. \ \ Ремонт, восстановление, модернизация. № 8, 2002г. С. 6... 12.

2. Стрельцов В. В., Попов В. П., Карпенков В. Ф. Ресурсосберегающая ускоренная обкатка отремонтированных двигателей. – М.: Колос, 1995. с. 58).

3. Рекомендации по применению металлоплакирующих присадок в составе автотракторных масел при заводской обкатке капитально отремонтированных сборочных единиц сельскохозяйственной техники. – М.: ГОСНИТИ. – 1991. с.9

УДК 656.13.08

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ АВАРИЙНОСТИ НА РЕГУЛИРУЕМЫХ ПЕРЕКРЕСТКАХ ПО МЕТОДУ ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ОПАСНОСТИ**Капский Д.В.***Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

Приведена краткая оценка аварийности в стране и основные пути ее снижения, выполнен анализ существующего положения в области прогнозирования аварийности. Он показал, что существующие методы прогнозирования аварийности не пригодны для практических работ по оптимизации решений в области организации дорожного движения на стадии разработки или проектирования.

Существуют три основных метода прогнозирования аварийности — статистический, конфликтных ситуаций и потенциальной опасности. *Статистический метод* применим, в основном, для предварительной оценки эффективности тех или иных мероприятий, внедряемых на реальных объектах улично-дорожной сети.

Метод конфликтных ситуаций применяется, как правило, на вновь построенных или реконструированных объектах с целью своевременной корректировки решений по организации движения.

Метод потенциальной опасности не требует ни реального объекта, ни статистики аварийности, а дает прогноз по совокупности факторов, влияющих на аварийность, которые можно либо измерить на реальном объекте, либо задать в любой комбинации при проектировании. Поэтому он применим для оптимизации решений как на реальном объекте, так и на стадии разработки или проектирования. К сожалению, на сегодняшний день этот метод отличается крайне невысокой точностью прогноза.

Потенциальная опасность — это невидимая, скрытая опасность, которая является некой сложной, закодированной функцией многих факторов и множества их комбинаций — интенсивность, скорость, регулирование, условия движения и т.д. Существуют три модификации метода потенциальной опасности — метод линейных графиков, метод конфликтных точек и метод замедлений. В БНТУ были разработаны методики прогнозирования аварийности на нерегулируемых и регулируемых перекрестках и пешеходных переходах. Одна из них — методика прогнозирования аварийности в конфликте транспорт-транспорт на регулируемых перекрестках — стала базовой для совершенствования метода потенциальной опасности.

Структурная формула для определения потенциальной опасности в конфликте транспорт-транспорт в базовой методике имеет вид произведения шести коэффициентов, каждый из которых представляет псевдонезависимую группу факторов, влияющих на аварийность, и определяется посредством зависимостей различного уровня сложности:

$$P_o = P_{он} \cdot K_v \cdot K_n \cdot K_y \cdot K_v \cdot K_\rho, \text{ усл.ед./год}, \quad (1)$$

Потенциальная опасность определяется для трех режимов конфликтного движения: нерегулируемого, внутрифазного, межфазного.

Совершенствование метода прогнозирования производилось при помощи специальной компьютерной программы поиска наилучших зависимостей между аварийностью и потенциальной опасностью по любой расчетной модели для любой исследуемой выборки, позволяющая варьировать различными параметрами и видом связей. В расчетную модель в заданном объеме и заданной последовательности вводились запланированные изменения и путем перебора вариантов определялась наилучшая зависимость между аварийностью и полученным значением потенциальной опасности. Проверка сходимости проводилась по стандартным критериям. Совершенствование производилось в следующей последовательности.

1. Были изменены некоторые расчетные зависимости для определения коэффициентов структурной формулы, т.е. зависимости внутри отдельных групп факторов.

2. В структурную формулу определения потенциальной опасности введен коэффициент времени, характеризующий продолжительность работы объекта в каждом из трех исследуемых режимов движения — нерегулируемом, внутрифазном и межфазном.

Поскольку в пределах конфликтной зоны конфликтные точки взаимодействуют между собой, то они ранжируются по величине потенциальной опасности — чем больше потенциальная опасность в данной конфликтной точке, тем ей придается большая значимость. Это связано с тем, что водители «настраиваются» на самую опасную, самую «тяжелую» конфликтную точку, а менее опасные конфликтные точки ими преодолеваются легко «с запасом». Более того, чем больше конфликтных точек в пределах конфликтной зоны, тем более собран водитель, что также в определенной степени снижает суммарную опасность. В результате суммирование потенциальной опасности конфликтных точек в пределах конфликтной зоны производится по следующей формуле:

$$P_{oz} = \left[\sum_{i=1}^N (P_{oi}^m) \right]^n, \quad (2)$$

где P_{oz} — потенциальная опасность в конфликтной зоне; P_{oi} — потенциальная опасность в конфликтной точке; N — количество конфликтных точек в конфликтной зоне; m и n — показатель степени.

3. Положение о взаимодействии конфликтных точек в пределах конфликтной зоны было перенесено на конфликтные зоны, связанные между собой траекториями движения второстепенных конфликтующих участников. Такие конфликтные зоны были ранжированы в пределах перекрестка по формуле:

$$P_{oz}^* = P_{oz} \cdot e^{-\beta} \leq P_{oi}, \quad (3)$$

$$\beta = \frac{P_o^m - P_o}{P_o^m (S - 5K_{nn})}, \quad (4)$$

где P^* — расчетное значение потенциальной опасности в исследуемой (второстепенной) конфликтной зоне; P_{oz} — начальное значение потенциальной опасности в исследуемой конфликтной зоне; P^m — максимальное значение потенциальной опасности в конфликтной точке «главной» конфликтной зоны; P_o — максимальное значение потенциальной опасности в конфликтной точке исследуемой конфликтной зоны; S — расстояние между ближайшими конфликтными точками исследуемой и «главной» конфликтной зоны.

4. Введено понятие «порог чувствительности потенциальной опасности» ниже которого потенциальная опасность не вызывает аварий в данной конфликтной точке. В результате, значения потенциальной опасности в конфликтных точках, которые находятся ниже порога чувствительности, не суммируются в пределах конфликтной зоны. Это особенно важно для прогнозирования аварийности на слабонагруженных перекрестках, что нашло свое подтверждение при контрольном прогнозировании на перекрестке улиц Дзержинского и Брикеля в г. Гродно.

5. Введено ранжирование коэффициентов структурной формулы определения потенциальной опасности, в результате чего она приобрела следующий вид:

$$P_o = P_{oi}^a \cdot K_{ov}^a \cdot K_{ov}^a \cdot K_{ov}^a \cdot K_{ov}^a \cdot K_{ov}^a \cdot K_{ov}^a \cdot K_{ov}^a; \quad (5)$$

Установлены значения показателей степени для каждого режима, которые находятся в пределах 0,9–1,2. Это ранжирование в определенной степени позволяет компенсировать те неточности, которые заложены в принятых

зависимостях определения каждого коэффициента структурной формулы, представляющего отдельную группу факторов. Кроме того, такое ранжирование позволит легко и быстро «настраивать» расчетную модель для прогнозирования аварийности в других регионах, отличающихся от Беларуси климатическими, экономическими, этническими и иными характеристиками.

6. Известно, что аварии сильно различаются по тяжести последствий и, следовательно, по величине полной (с учетом социальной составляющей) стоимости, поэтому от прогноза требуется не только количество аварий, но и тяжесть их последствий. Тяжесть последствий аварий в исследуемом конфликте сильно зависит от скорости, массы, возможности предпринятия уклончивых действий и т.д. Все эти факторы учитываются при расчете потенциальной опасности, поэтому на выходе прогноза должно быть не просто число аварий, а число приведенных по потенциальной опасности аварий. В результате этих исследований установлены значения коэффициента приведения аварий с ранением к авариям с материальным ущербом для каждого режима движения. Таким образом, по данному методу прогнозируется не просто число аварий, а приведенное по потенциальной опасности число аварий с материальным ущербом, что, в принципе, позволяет прогнозировать аварийные потери. При этом, для нерегулируемого режима одна авария с ранением примерно равноценна 3 авариям с материальным ущербом, для внутрифазного режима — 2 авариям, а для межфазного режима — 4 авариям.

Для оценки представительности исследуемой выборки объектов она была увеличена на 4 перекрестка. По последней расчетной модели были найдены наилучшие зависимости между аварийностью и потенциальной опасностью. Оказалось, что зависимости практически идентичны, а точность повысилась незначительно. Видно, что каждый этап сопровождался улучшением всех оценочных критериев, а окончательная точность прогноза стала приемлемой для практической оптимизации решений по организации дорожного движения.

Для оценки адекватности усовершенствованного метода было проведено контрольное прогнозирование аварийности для трех перекрестков, расположенных в г.г. Минске, Гродно и Гомеле. По согласованию с ГАИ были собраны исходные данные, выполнено прогнозирование и результаты были направлены в соответствующие ГАИ с просьбой предоставить информацию по аварийности на этих перекрестках. После получения такой информации были определены ошибки прогноза, которые не превысили 40 %.

Затем эти три перекрестка были добавлены в увеличенную выборку, которая в результате составила 43 перекрестка, 2771 конфликтную точку и 1025 аварий и стала окончательной (конечной). Следует отметить, что зависимости и точность прогноза остались, практически, неизменными.

Разработана методика прогнозирования аварийности по методу потенциальной опасности в конфликте транспорт–транспорт на регулируемых перекрестках с двухфазным светофорным циклом, позволяющая внедрить в практику организации дорожного движения усовершенствованный метод прогнозирования и повысить безопасность движения на регулируемых перекрестках до 10 %. Рассмотрены требования к исходным данным, приведены алгоритм и пример расчета вероятной аварийности. Методика изложена таким образом, что позволяет пользователю самостоятельно выполнить прогнозирование аварийности. Создана компьютерная программа, которая позволяет резко ускорить и облегчить получение исходных данных и выполнение расчетов и делает прогнозирование аварийности реально возможным в любой заинтересованной организации. Результаты работы внедрены в УГАИ ГУВД Мингорисполкома и используются в Следственном комитете МВД РБ, ГАИ Гомельоблисполкома. Экономический эффект в результате внедрения исследований составил 18,7 млн. руб., ожидаемый экономический эффект составляет около 1,3 млрд.руб.

Результаты исследований могут дать быстрый и значимый эффект снижения аварийных потерь общества в дорожном движении.

УДК 656

СПЕЦИАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АЛГОРИТМЫ В МОДЕРНИЗИРУЕМЫХ СИСТЕМАХ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ ДОРОЖНЫМ ДВИЖЕНИЕМ

Навой Д.В.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

В настоящее время в состав программно-алгоритмического обеспечения действующей в г. Минске АСУД входят следующие группы технологических алгоритмов: 1. Локальные 2. Основные 3. Вспомогательные 4. Специальные 5. Сервисные...

Локальные алгоритмы управления обеспечивают управление движением транспорта на изолированных перекрестках и реализуются аппаратно. Основные алгоритмы обеспечивают координированное управление дорожным движением в регулируемом районе. Вспомогательные алгоритмы управления обеспечивают увеличение эффективности АСУД. В состав вспомогательных алгоритмов входят:

Алгоритм переходного периода, коррекции плана координации по скорости, местной коррекции планов координации, сглаживания значений скорости, сглаживания значений интенсивности, определения задержки, градиентного спуска, определения эффективности управления. Специальные технологические алгоритмы в действующей АСУД предназначены для управления дорожным движением в особых условиях. В состав группы специальных технологических алгоритмов входят следующие алгоритмы: Алгоритм обнаружения заторов, диспетчерского управления, приоритетного пропуска специальных транспортных единиц, управления маршрутами «зеленая улица, перераспределения транспортных потоков при обнаружении заторов. Сервисные алгоритмы предназначены для обработки статистических данных о режимах функционирования периферийных устройств и параметров транспортных потоков, формирования и вывода оперативного журнала, при работе вычислительного комплекса вне контура управления. В действующей АСУД алгоритмы переходных процессов включены в состав вспомогательных алгоритмов. Существующий единый алгоритм переходного периода, предназначен для ввода светофорной сигнализации в координированное управление при смене планов координации, после окончания диспетчерского или ручного управления, управления маршрутами «зеленая улица», а также при введении отключенного светофорного объекта в режим «координированное управление». При создании модернизированной АСУД предлагается изменить структуру программно-алгоритмического обеспечения, которое должно состоять из следующих подсистем: Подсистемы управления дорожным движением. Подсистемы функционирования. Подсистемы контроля и специальных режимов. Общесистемных алгоритмов.

Каждая из подсистем управления в свою очередь должна содержать: основные технологические алгоритмы; специальные технологические алгоритмы; аналитические алгоритмы. В подсистеме управления дорожным движением специальные технологические алгоритмы представлены следующим образом:

1. Алгоритмы переходных процессов: изменение режима регулирования; изменение набора сдвигов; запрещение сдвигов.

2. Алгоритмы резервирования управления: переход на резервную программу из центра; переход на резервную программу на периферии.

3. Алгоритмы сбора информации: детектирование данных о параметрах дорожного движения (интервалы движения, интенсивность, состав потока, скорость движения, длина очереди, задержка, количество остановок, импульс интенсивности); формирование массивов исходных данных по видам параметров; аналитические и статистические алгоритмы обработки исходных

данных; актуализация данных о параметрах транспортных потоков; ведение баз данных управления и взаимодействие с другими базами.

4. Алгоритмы отображения: схема УДС с дислокацией объектов управления; визуализация значений параметров дорожного движения; визуализация значений критериев управления; визуализация состояния и режимов светофорной сигнализации; визуализация отчетных документов.

5. Алгоритмы подготовки технологических алгоритмов формирование массивов установок регулирования; формирование библиотеки управляющих воздействий; формирование сценариев управляющих воздействий; формирование контура управления; тестирование программного обеспечение.

6. Аналитические алгоритмы (алгоритмы экспертной системы) актуализация данных о параметрах транспортных потоков; моделирование дорожно-транспортных ситуаций; расчет показателей качества; прогнозирование параметров дорожного движения; диагностика особых условий и состояний; анализ критических состояний; регулирование в особых условиях; контроль допустимости управляющих воздействий; построение и оптимизация сценариев управляющих воздействий; системный тест массивов управляющих воздействий; алгоритмы информационного обмена с САПР ОДД; формирование отчетных документов (журнал технолога АСУД, журнал диспетчера АСУД, отчет по параметрам дорожного движения на объектах АСУД, отчеты по управлению объектами АСУД, отчет по параметрам дорожного движения на объектах АСУД); справочная система по нормативам управления дорожным движением.

В подсистеме функционирования специальные технологические алгоритмы представлены следующим образом:

1. Алгоритмы диагностики состояния технических устройств: контроль аварийного сообщения от периферийных устройств; определение состояния периферийных устройств (дорожный контроллер, вскрытие шкафа ДК, детектор транспорта, светофорные лампы); диагностика неисправности агрегатов ДК; тестирование состояния линий связи; тестирование программного обеспечения.

2. Алгоритмы резервирования управления: переход на резервную программу из центра; переход на резервную программу на периферии.

3. Алгоритмы сбора информации: формирование массивов данных по состоянию технических устройств; формирование массивов данных по управляющим воздействиям; формирование массивов данных по диспетчерским запросам; аналитические и статистические алгоритмы обработки исходных данных; ведение баз данных функционирования и взаимодействие с другими базами данных.

4. Алгоритмы отображения: схема УДС с дислокацией технических устройств; состояние технических устройств; ресурсы технических устройств; визуализация управляющих воздействий; визуализация отчетных документов по функционированию АСУД.

5. Аналитические алгоритмы (алгоритмы экспертной системы):

идентификация нештатных ситуаций и отказов; выработка управляющих воздействий при нештатных ситуациях; блокировка неверных воздействий; анализ функционирования; анализ функционирования по объектам управления; анализ функционирования по подсистемам АСУД; анализ функционирования по подразделениям СМЭП; формирование отчетных документов (журнал функционирования АСУД, журнал диспетчера АСУД, паспорт светофорного объекта, формуляры оборудования, формуляры работы подразделений СМЭП); справочная система по должностным обязанностям технолога АСУД; справочная система по нормативам функционирования АСУД.

В подсистеме контроля и специальных режимов специальные технологические алгоритмы представлены следующим образом:

1. Алгоритмы диагностики состояния технических устройств: контроль аварийного сообщения от периферийных устройств; определение состояния периферийных устройств (дорожный контроллер, вскрытие шкафа ДК, детектор транспорта, светофорные лампы). диагностика неисправности агрегатов ДК; тестирование состояния линий связи; тестирование программного обеспечения.

2. Алгоритмы резервирования управления: переход на резервную программу из центра; переход на резервную программу на периферии.

3. Алгоритмы сбора информации: формирование массивов данных по состоянию технических устройств; данных по управляющим воздействиям; данных по диспетчерским запросам; аналитические и статистические алгоритмы обработки исходных данных; ведение баз данных функционирования и взаимодействие с другими базами данных.

4. Алгоритмы отображения: схема УДС с дислокацией технических устройств; состояние технических устройств; ресурсы технических устройств; визуализация управляющих воздействий; визуализация отчетных документов по функционированию АСУД.

5. Аналитические алгоритмы (алгоритмы экспертной системы): идентификация нештатных ситуаций и отказов; выработка управляющих воздействий при нештатных ситуациях; блокировка неверных воздействий; анализ функционирования; анализ функционирования по объектам управления; анализ функционирования по подсистемам АСУД; анализ функционирования по подразделениям СМЭП; формирование отчетных документов (журнал функ-

ционирования АСУД, журнал диспетчера АСУД, паспорт светофорного объекта, формуляры оборудования, формуляры работы подразделений СМЭП) справочная система по должностным обязанностям технолога АСУД; справочная система по нормативам функционирования АСУД.

Общесистемные алгоритмы включают в себя системное программное обеспечение, которое представлено следующими алгоритмами: алгоритмы администрирования доступа к управлению; антивирусные алгоритмы; тестирование программного обеспечения.

Алгоритмы переходных процессов модернизированной АСУД входят в группу специальных технологических алгоритмов подсистемы управления дорожным движением. И если в существующей АСУД представлен только один алгоритм переходного периода, то в модернизируемой системе предлагается рассмотреть несколько алгоритмов переходных процессов: 1. Смена позиции управляемого дорожного знака (УДЗ) Предшествующим состоянием является исходная, либо предыдущая позиция УДЗ. Результатом является новая позиция УДЗ. 2. Смена позиции знака управляющего скоростными режимами (УСК) Предшествующим состоянием является позиция УСК. Функцией — алгоритм смены позиции УСК: снятие позиции, отсутствие позиции, введение позиции. Результатом является новая позиция УСК. Результат — локальное регулирование светофорное регулирование. 3. Переход из нерегулируемого режима в координированное управление (КУ), магистральное управление (МУ), ручное управление (РУ). Предшествующим состоянием является режим «желтого мигания» (ЖМ) или отключение светофора (ОС). Результат — координированное регулирование. 4. Переход из регулируемого режима в нерегулируемый. Предшествующими состояниями могут быть режимы локального регулирования, координированного либо магистрального управлений. Результат — режим ЖМ (ОС). 5. Переход из локального регулирования в координированное управление. Предшествующее состояние — локальное регулирование. Исходные данные — план координации, план управления в районе. Функция — включение фазы, соответствующей нулевому моменту плана координации, алгоритм синхронизации фаз и алгоритм коррекции порядка фаз. Результат — КУ, МУ, РУ. 6. Смена плана координации при координированном управлении. Предшествующее состояние — план КУ, МУ, РУ. Результат — новый план КУ, МУ, РУ. Использование специальных технологических алгоритмов переходных процессов в модернизированной АСУДД, позволит обеспечить минимум потерь при различных переходных режимах путем контроля и ограничения сдвигов, приводящих к увеличению потерь. Изучение объема потерь при существующих переходных режимах позволит оптимизировать структуру алгоритмов переходных процессов в модернизированной АСУДД и снизить издержки движения.

УДК 656.13

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ИНТЕНСИВНОСТИ ДВИЖЕНИЯ АВТОТРАНСПОРТА

Рожанский Д.В.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

Многочисленными исследованиями установлен факт взаимосвязи аварийности и интенсивности движения транспорта и пешеходов. Эта зависимость является статистической и характеризуется ростом аварийности с увеличением интенсивности движения. Для построения адекватной математической модели аварийности в дорожном движении правильный учет влияния интенсивности имеет особо важное значение.

Погрешность определения показателя интенсивности движения зависит от количества замеров и их продолжительности. Таким образом, получение достоверной информации об интенсивности движения невозможно без оценки погрешности, допускаемой при нахождении показателя интенсивности, и выбора адекватного режима проведения замеров. Для решения указанной задачи были проведены экспериментальные и теоретические исследования.

Экспериментальная часть работы состояла в замерах интенсивности движения транспорта в г. Минске по ул. Кнорина на участке между ул. Толбухина и ул. Белинского. Замеры проводились на протяжении декабря и первой половины января месяца. Для того, чтобы исключить влияние систематической погрешности, связанной с измерением интенсивности в течение недели, замеры выполнялись каждую неделю в один и тот же день. Интервал времени, в пределах которого проводились наблюдения, составлял 12 часов: с 9 до 21 часа. Замеры выполнялись каждый час таким образом, что начинались за 5 мин до окончания текущего часа и заканчивались через 10 мин после начала следующего. Например, начало замеров в 8.55, окончание — в 9.10. В результате, длительность каждого опыта (от начала первого замера и до окончания последнего) составляет 15 мин. Продолжительность отдельного замера в пределах опыта равна 1 мин. Все транспортные средства, проехавшие в течение минуты через поперечное сечение дороги, фиксируются в соответствии с их категорией и направлением движения. Такая методика проведения замеров позволяет получить ежеминутную интенсивность движения транспорта в пределах каждого пятнадцатиминутного опыта. Поскольку опыты проводятся каждый час, их количество определяется продолжительностью наблюдений: при две-

надцатичасовом режиме наблюдений 13 опытов. Всего было проведено 7 наблюдений — по одному в неделю каждый четверг.

Для организации базы данных, полученных в ходе эксперимента, разработана специальная компьютерная программа.

Целью теоретических исследований являлись выбор показателя интенсивности движения и оценка погрешности его определения в зависимости от режима проведения замеров.

В качестве возможных показателей интенсивности движения рассматривались три параметра:

- традиционно используемое среднее арифметическое;
- параболическое среднее, т.е. среднее значение полинома, посредством которого аппроксимировалась реализация случайной зависимости интенсивности движения от времени суток;
- интегральное среднее — среднее значение определенного интеграла, полученного в результате численного интегрирования интенсивности движения по времени методом Симпсона.

Расчеты показателей интенсивности движения проводились по специально разработанной компьютерной программе, которая использует базу данных по интенсивности движения и составляет единый пакет вместе с программой формирования базы данных. Помимо показателей интенсивности движения программа выдает коэффициенты аппроксимирующего полинома, полную и остаточную дисперсии, значение критерия Фишера и коэффициент детерминации. Программа позволяет проводить расчеты по любому числу опытов в пределах их количества, определяемого продолжительностью наблюдений. При этом из принятого числа опытов можно учитывать как все опыты подряд, так и делать выборку через один опыт, через два и т.д. Вычисление среднего значения интенсивности движения на протяжении одного опыта может проводиться по различному количеству замеров в пределах их максимального числа.

Все расчетные исследования выполнялись с использованием разработанного пакета программ. Прежде всего был выбран порядок параболы, аппроксимирующей опытные данные.

Применение критерия Фишера позволяет сделать вывод о возможности использования в качестве аппроксимирующего полинома параболы второй или третьей степени. В дальнейшем параболическое среднее рассчитывается применительно к параболе второй степени.

На следующем этапе исследования изучалось влияние режима проведения замеров на погрешность определения показателей интенсивности движения. Для этого рассчитывались значения показателей интенсивности при

различных сочетаниях количества опытов и числа точек осреднения интенсивности в пределах опыта.

Максимально рассматривалось 13 опытов, которые отбирались из сформированной базы данных в интервале наблюдений от 9 до 21 часа, т.е. продолжительность наблюдений составляла 720 мин. Из этой последовательности опытов делалась выборка через 1, через 2, через 3 и через 5 опытов, в результате чего получились последовательности из 7, 5, 4 и 3 опытов соответственно. Внутри каждой последовательности интервалы между соседними опытами постоянны. Предварительными расчетами было установлено, что использование последовательностей из 3 и 4 опытов приводит к большим погрешностям определения показателей интенсивности, поэтому в дальнейших исследованиях использовались последовательности из 5, 7 и 13 опытов.

В пределах каждой последовательности опытов показатели интенсивности рассчитывались при 2, 5, 10 и 15 точках (замерах) осреднения интенсивности. Поскольку продолжительность каждого замера составляет 1 мин, задаваемая в расчетах продолжительность опыта в минутах численно равна количеству замеров, по которым проводится осреднение, т.е. 2, 5, 10 и 15 мин.

Такие расчеты показателей интенсивности выполнялись для каждого из 7 наблюдений. Погрешность определения показателя интенсивности вычислялась по отношению к его значению, полученному при использовании последовательности из 13 опытов и длительности опыта 15 мин.

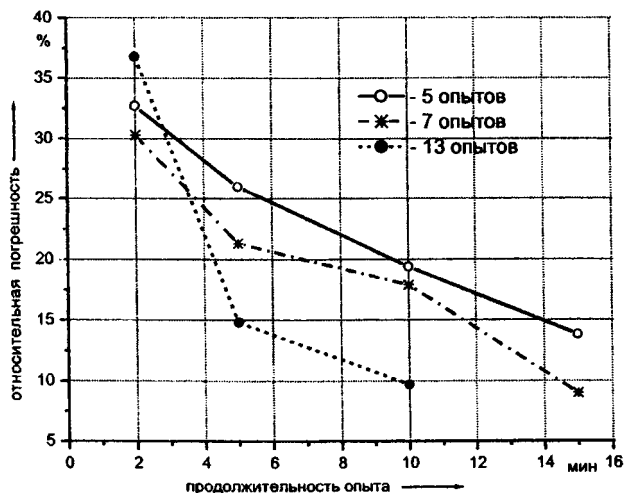


Рис. 1. Верхние доверительные границы погрешности среднего арифметического

Поскольку показатели интенсивности движения, а значит и их относительные погрешности, являются случайными величинами, были определены верхние доверительные границы относительных погрешностей.

На рис. 1 показаны зависимости верхней доверительной границы относительной погрешности среднего арифметического от продолжительности опыта при 5, 7 и 13 опытах. Из графиков следует, что при продолжительности опыта менее 4-5 мин число опытов не оказывает определенного влияния на величину погрешности. Одинаковые значения погрешности показателя интенсивности движения можно получить при различных сочетаниях числа опытов и их продолжительности. Например, верхняя доверительная граница погрешности, не превышающая 15% достигается при 13 опытах продолжительностью 5 мин каждый, либо при 5 опытах продолжительностью по 15 мин. Погрешность до 10% может быть получена в случае проведения 13 десятиминутных или 7 пятнадцатиминутных опытов.

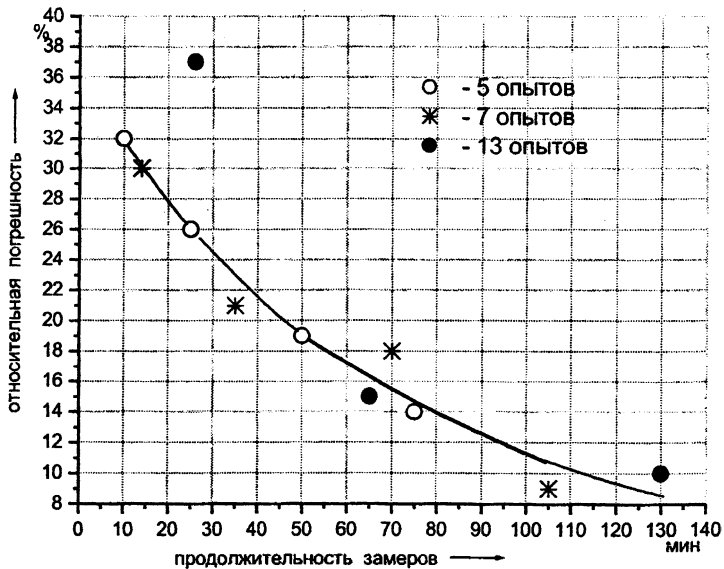


Рис. 2. Зависимость погрешности от общей продолжительности замеров

Точечная диаграмма, представленная на рис.2, отражает связь погрешности среднего арифметического с общей продолжительностью замеров

(надежность оценки 90%, доверительная вероятность 90%). Общая продолжительность замеров T_3 представляет собой произведение числа опытов на продолжительность опыта. Как видно из рис.2, почти все точки диаграммы располагаются вблизи некоторой кривой. Это означает, что в диапазоне принятых значений числа и продолжительности опытов погрешность показателя интенсивности движения зависит, главным образом, от общей продолжительности замеров. Выброс точки $T_3=26$ мин и $N=13$, соответствующей продолжительности опыта 2 мин, лишний раз свидетельствует о том, что такая длительность опыта недопустима. Указанный график позволяет определить требуемую продолжительность опыта в зависимости от числа опытов или наоборот, при заданной погрешности расчета. Для получения погрешности среднего арифметического, не превышающей, например, 10%, общая продолжительность замеров должна быть не менее 110 мин, т.е. при 5 опытах длительность каждого из них составит 22 мин.

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы:

- длительность одного опыта должна быть не менее 5 мин;
- число опытов и длительность каждого опыта следует выбирать таким образом, чтобы общая продолжительность замеров обеспечивала необходимую точность расчета, например, общая продолжительность замеров 75 мин позволит получить погрешность среднего арифметического не более 16% при доверительной вероятности 90%;
- в качестве показателя интенсивности движения можно принимать среднее арифметическое значений интенсивностей, полученных в каждом опыте.

УДК 656.13

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ГОРОДСКИМ ПАССАЖИРСКИМ ТРАНСПОРТОМ

Скирко́вский С.В.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

Одной из причин малоэффективной работы городского наземного пассажирского транспорта является несовершенство сложившейся системы управления. Существующая система управления пассажирским городским транспортом не стимулирует работу большей части перевозчиков по снижению затрат и повышению качества обслуживания пассажиров. Все это обуславливает необходимость совершенствования управления городскими перевозками пассажиров.

Система управления городским пассажирским транспортом функционирует на двух этапах:

- 1) предварительная организация перевозок;
- 2) текущее выполнение перевозок.

На первом этапе производится разработка маршрутной сети, а также выбор транспортных средств и определение их числа для работы на маршрутах. При этом должны решаться следующие задачи:

получение информации об объемах перевозок пассажиров и пассажиропотоках; формирование рациональной маршрутной сети; координация работы различных видов транспорта; нормирование скоростей и режимов движения на маршрутах; принятие тарифных схем; расчет технико-эксплуатационных и технико-экономических показателей работы перевозчиков.

Реализация функций на втором этапе обеспечивает функционирование разработанной системы перевозок пассажиров:

— заключение договоров с перевозчиками на обеспечение перевозок на маршрутах; определение величин тарифов; определение числа пассажирских транспортных средств для работы на маршрутах по сезонам года, часам суток и дням недели; разработка расписания движения пассажирских транспортных средств; доведение информации до пассажиров; контроль за техническим состоянием пассажирских транспортных средств, работающих на маршруте; контроль за регулярностью движения пассажирских транспортных средств; диспетчеризация движения пассажирских транспортных средств для компенсации воздействия на систему перевозок внешних и внутренних факторов.

Внешними факторами, влияющими на устойчивость перевозочного процесса, являются: изменение спроса на перевозки во времени, по направлениям и участкам маршрутов; изменение условий движения за счет колебаний интенсивности движения транспортных средств во времени на уличной дорожной сети; регулирование дорожного движения; природно-климатические условия и др.

Большое влияние на организацию перевозок пассажиров и повышение эффективности использования пассажирского транспорта оказывает неравномерность распределения пассажиропотоков во времени. Колебания пассажиропотоков по часам суток связаны с режимом работы предприятий и организаций, учебных заведений, организаций культурно-бытового назначения. Значительную утреннюю и вечернюю пассажиронапряженность создают трудовые поездки населения между промышленными районами и жилыми массивами в данный отрезок времени. В будние дни имеет место два пиковых периода. Первый (утренний) характеризуется небольшой продолжительностью (1,5–2 ч) и высокой напряженностью. Второй (вечерний) менее напряженный и более продолжительный по времени. В пиковые периоды при недостаточной провозной способности на маршруте происходит переполнение пассажирских транспортных средств. В этом случае коэффициент наполняемости достигает 1,2, что снижает качество перевозок пассажиров.

Во внепиковый период наблюдается значительный спад пассажиропотоков. В это время преобладают деловые и культурно-бытовые поездки населения. Межпиковое время без принятия должных мер вызывает снижение эффективности использования транспортных средств, значительное увеличение интервалов их движения и, как следствие, увеличение времени ожидания пассажирами посадки и, соответственно, длительности поездки.

Другая ситуация наблюдается в выходные и праздничные дни, когда происходит постепенный рост пассажиропотоков до 11–12 часов дня и затем постепенное уменьшение.

Колебания пассажиропотоков носят случайный, но закономерный характер. Изменение величины пассажиропотока по часам суток, дням недели и месяцам (сезонам) года может быть описано рядом Фурье и другими зависимостями:

$$Z(t) = Z_0 + \sum_{i=1}^{h_1} \left(b_{1,i} \sin \frac{2\pi it}{24} + a_{1,i} \cos \frac{2\pi it}{24} \right) + \sum_{i=1}^{h_2} \left(c_{2,i} \left(7 \left\{ \frac{t}{168} \right\} \right)^i \right) + \sum_{i=1}^{h_3} \left(b_{3,i} \sin \frac{2\pi it}{2184} + a_{3,i} \cos \frac{2\pi it}{2184} \right), \quad (1)$$

где $b_{1,i}, b_{3,i}, a_{1,i}, a_{3,i}$ — коэффициенты многочлена Фурье; $c_{2,i}$ — коэффициент степенного многочлена i -й степени; h_1 — порядок многочлена Фурье; h_2 — порядок степенного многочлена; t — текущее значение календарного времени с отчетом от начала года в часах; 24, 168, 2184 — периоды колебаний спроса на перевозки соответственно суточный, недельный и сезонный; $\{t/168\}$ — дробная часть, получаемая в результате деления.

Проверка адекватности уравнения экспериментальным данным производится по критерию Фишера. Пользуясь предложенной зависимостью, можно спрогнозировать величину пассажиропотока в конкретный момент времени, что позволит принять адекватное решение.

Повысить эффективность работы пассажирской транспортной системы в межпиковый период можно путем перехода от интервальной работы в часы «пик» на работу по расписанию в моменты спада пассажиропотока. Работа транспортных средств по расписанию при низкой частоте их движения дает сокращение времени пассажиров в ожидании посадки, увеличение коэффициента наполняемости. Однако до настоящего времени нет научно обоснованной методики определения момента перехода с интервальной формы организации движения транспортных средств на маршруте перевозок пассажиров на организацию движения по расписанию и наоборот.

Задача состоит в определении количества транспортных средств (интервала движения), необходимых для освоения сложившегося пассажиропотока, а также выборе формы работы (по расписанию или интервалу). Такая задача решается при переходе от внепиковых периодов к пиковым и обратно.

Предлагается в качестве целевой функции определения момента изменения формы организации движения принять суммарные затраты, включающие транспортные потери от снижения загрузки транспортной системы, и потери пассажиров, связанных с ожиданием поездки и затрат перевозчика, обусловленных организацией процесса перевозки по различным формам работы.

Зависимость, позволяющая сделать выбор в пользу того или иного способа организации движения подвижного состава на линии, выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned} Q_n t_{\text{ож.р}} S_{\text{ч.п}} + \frac{A_p l_0}{t_0} S_{\text{пер.а}} + A_p C_{\text{ч.а}} + (A_n - A_p) C_{\text{ч.н}} &\leq \\ \leq Q_n t_{\text{ож.и}} S_{\text{ч.п}} + \frac{A_n l_0}{t_0} S_{\text{пер.а}} + A_n C_{\text{ч.а}} + (A_n - A_n) C_{\text{ч.н}}, & \end{aligned} \quad (2)$$

где Q_n — объем спроса на перевозки на наиболее загруженном участке маршруте, пасс; $t_{\text{ож.р}}$, $t_{\text{ож.и}}$ — соответственно среднее время ожидания пассажиром посадки при работе по расписанию и интервалу, ч; A_n и A_p — соответственно количество транспортных средств, работающих по расписанию и

интервалу; A_m — расчетное количество транспортных средств, для работы на маршруте с учетом резерва; l_o — длина оборотного рейса, км; t_o — время оборота на маршруте, ч; $S_{ч.п}$ — стоимость одного пассажиро-часа ожидания посадки, руб; $C_{ч.а}$ — постоянные затраты, приходящиеся на час работы транспортного средства, руб/ч; $C_{ч.н}$ — постоянные затраты, приходящиеся на час простоя транспортного средства без работы, руб/ч; $S_{пер.а}$ — переменные затраты, приходящиеся на 1 км пробега транспортного средства при работе на маршруте, руб/км.

Количество транспортных средств, необходимых для перевозки пассажиров, рассчитывается по формуле

$$A_m = \frac{Q_n t_o}{q\gamma} = \frac{t_o}{I}, \quad (3)$$

где q — вместимость транспортного средства; γ — коэффициент использования вместимости; I — интервал движения транспортных средств на маршруте.

В процессе работы под воздействием различных факторов интервал движения может отклоняться от расчетного и тогда фактический интервал I_ϕ рассчитывается по формуле (1):

$$I_\phi = I + \sigma_1^2 / I, \quad (4)$$

где σ_1^2 — среднеквадратическое отклонение от планового интервала движения.

Время ожидания при работе по интервалу (1):

$$t_{ож.и} = \frac{I_\phi}{2} = \frac{I + \sigma_1^2 / I}{2} = \frac{I}{2} + \frac{\sigma_1^2}{2I}, \quad (5)$$

Подставив формулу (3) и (5) в выражение (2) получим

$$\begin{aligned} Q_n(t_{ож.п} S_{ч.п} + \frac{l_o}{q_p \gamma_p} S_{пер.а} + \frac{t_o}{q_p \gamma_p} C_{ч.а}) + (A_m - \frac{Q_n t_o}{q_p \gamma_p}) C_{ч.н} = \\ = Q_n((\frac{I}{2} + \frac{\sigma_1^2}{2I}) S_{ч.п} + \frac{l_o}{q_n \gamma_n} S_{пер.а} + \frac{t_o}{q_n \gamma_n} C_{ч.а}) + (A_m - \frac{Q_n t_o}{q_n \gamma_n}) C_{ч.н}, \end{aligned} \quad (6)$$

где γ_n и γ_p — соответственно коэффициент использования вместимости при работе по интервалу и по расписанию; q_n и q_p — соответственно вместимость подвижного состава, работающего по интервалу и расписанию.

Левая часть неравенства выражает стоимость затрат пассажиров, связанные с ожиданием посадки и затраты перевозчика при организации движения на маршруте по расписанию, а правая — по интервалу.

Время ожидания посадки при работе по расписанию на маршруте определяется статистическими методами.

Если левая часть неравенства меньше правой, то целесообразна форма организации движения транспортных средств по расписанию, в противном случае эффективнее будет работа по интервалу. Если обе части неравенства равны, то нет разницы в форме организации работы транспортных средств на маршруте.

Таким образом, нами установлено условие для выбора оптимальной формы организации движения на маршруте. При этом обеспечивается соответствие провозных возможностей пассажирского транспорта сформированному спросу.

Литература:

1. Спириин И.В. Городские автобусные перевозки. — М.: Транспорт, 1991. — 238 с.

УДК 656.13

РАЗРАБОТКА НОВОЙ РЕДАКЦИИ ПРАВИЛ АВТОМОБИЛЬНЫХ ПЕРЕВОЗОК ПассажиРОВ

Седюкевич В.Н. Скирковский С.В.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

При разработке новой редакции Правил автомобильных перевозок пассажиров в качестве цели приняты:

- повышение качества обслуживания пассажиров;
- повышение безопасности перевозок;
- повышение эффективности работы автомобильных перевозчиков.

С целью повышения качества обслуживания пассажиров в Правилах установлены требования точности исполнения расписания: при городских и пригородных перевозках по прибытию на остановочный пункт не ранее чем на 3 минуты и не позже чем на 5 минут относительно расписания; при междугородных перевозках по прибытию на остановочный пункт не ранее чем на 5 минут и не позже чем на 10 минут относительно расписания и по отправлению не ранее чем по расписанию.

Установлено также, что при маршрутных перевозках необходимо обеспечивать движение строго по маршруту с посадкой-высадкой пассажиров в

установленных для этого местах после полной остановки у передней границы остановочного пункта (или как можно ближе к ним) в пределах остановочного пункта вдоль продольного края посадочной площадки или тротуара (не далее 0,3 метра по горизонтали от продольного края посадочной площадки или тротуара до подножки транспортного средства). При вынужденной посадке-высадке в других местах обеспечить отсутствие помех другим транспортным средствам и пешеходам, посадку с тротуара и высадку на тротуар или обочину без необходимости пассажирам переходить проезжую часть дорог в зоны тяготения.

Правилами предусматривается введение ночных маршрутов для выполнения перевозок пассажиров в регулярном сообщении в ночное время от железнодорожных вокзалов, автовокзалов и других объектов по направлению от них и к ним для освоения имеющихся пассажиропотоков.

При разработке новой редакции Правил была найдена зависимость, позволяющая определить момент перехода работы на маршрутах с интервала на расписание которая, выглядит следующим образом:

$$Q_n t_{\text{ож.р}} S_{\text{ч.п}} + \frac{A_p l_o}{t_o} S_{\text{пер.а}} + A_p C_{\text{ч.а}} + (A_m - A_p) C_{\text{ч.н}} \leq \\ \leq Q_n t_{\text{ож.и}} S_{\text{ч.п}} + \frac{A_n l_o}{t_o} S_{\text{пер.а}} + A_n C_{\text{ч.а}} + (A_m - A_n) C_{\text{ч.н}},$$

где Q_n — объем спроса на перевозки на наиболее загруженном участке маршруте, пасс; $t_{\text{ож.р}}$, $t_{\text{ож.и}}$ — соответственно среднее время ожидания пассажиром посадки при работе по расписанию и интервалу, ч; A_m и A_p — соответственно количество транспортных средств, работающих по расписанию и интервалу; A_m — расчетное количество транспортных средств, для работы на маршруте с учетом резерва; l_o — длина оборотного рейса, км; t_o — время оборота на маршруте, ч; $S_{\text{ч.п}}$ — стоимость одного пассажиро-часа ожидания посадки, руб; $C_{\text{ч.а}}$ — постоянные затраты, приходящиеся на час работы транспортного средства, руб/ч; $C_{\text{ч.н}}$ — постоянные затраты, приходящиеся на час простоя транспортного средства без работы, руб/ч; $S_{\text{пер.а}}$ — переменные затраты, приходящиеся на 1 км пробега транспортного средства при работе на маршруте, руб/км.

После выполнения расчетов определено, что при интервале движения транспортных средств по маршруту 15 мин и более целесообразно организовывать их движение по расписанию. Снижение с 30 мин до 15 мин позволяет улучшить качество обслуживания пассажиров и эффективность работы автобусов, за счет снижения среднего времени ожидания до 5 минут, увеличения наполняемости автобусов и снижения пересадочности перевозок. Недоста-

ток — увеличение объема информации, приводимой на информационных табличках на остановочных пунктах.

Предложена система обозначения маршрутов, основанная на изучении опыта других государств и практики городов Республики Беларусь. Каждому городскому маршруту по перевозкам в регулярном сообщении предусматривается присваивать номер: обычному — от 1 до 199, скоростному — от 1 до 199 с символом «С», экспрессному — от 1 до 199 с символом «Э» и ночному от 1 до 199 с символом «Н». Символы указываются после номера через дефис.

Правилами определена обязанность объявлять остановки (при междугородных и международных перевозках время стоянки на них), а при изменении маршрута объявлять об этом на каждом остановочном пункте; предупреждать пассажиров о закрытии дверей пассажирского транспортного средства; выполнять перевозку пассажиров в регулярном сообщении в соответствии с утвержденным расписанием движения, а в нерегулярном сообщении — в соответствии с договором перевозки; периодически напоминать пассажирам о необходимости оплаты проезда (при городских перевозках); предупреждать пассажиров о предстоящей проверке проездных документов; информировать пассажиров об условиях перевозки и требованиях к их поведению в соответствии с установленным автомобильным перевозчиком текстом.

В Правилах устанавливается, что при городских на нижнем поле знака «Место остановки автобуса и (или) троллейбуса» или на информационной табличке, установленных на передней границе остановочного пункта, должны быть приведены сведения о движении пассажирских транспортных средств для каждого маршрута, проходящего через данный остановочный пункт: номер и конечный пункт маршрута, а также для будних, выходных и праздничных дней расписание движения автобусов для первого и последнего рейса и по периодам суток или интервал движения автобусов (если интервал движения не более 15 минут) или расписание движения по рейсам (если интервал движения более 15 минут). Устанавливается, что начальный и конечный остановочные пункты междугородного маршрута по перевозке пассажиров в регулярном сообщении, расположенные на территории города или поселка городского типа, должны иметь пассажирский терминал. Промежуточный остановочный пункт междугородного маршрута по перевозке в регулярном сообщении, расположенный вне территории населенного пункта городского типа (на автомобильной дороге), должен иметь переходно-скоростные полосы, уширение дороги, остановочную площадку с усовершенствованным твердым покрытием, посадочную площадку, навес или навильон, и обозначение остановочного пункта, аналогичное обозначению остановочного пункта при пригородных перевозках.

Для повышения безопасности перевозок пассажиров и защиты прав граждан в Правилах введен порядок перевозок домашних животных. Мелких домашних животных (собак, кошек и т.п.) и птиц допускается перевозить при условии соблюдения мер безопасности и санитарных норм в упаковке (в клетках, ящиках, мешках, сумках с водонепроницаемым адсорбирующим дном) и при условии, что пассажир берет на себя всю ответственность за них. Для международной перевозки необходимо наличие соответствующим образом оформленных документов. Собаку крупной породы разрешено перевозить лицам не моложе 16 лет, при этом собака должна быть в наморднике и обеспечена безопасность других граждан. При городских перевозках в регулярном сообщении перевозка собаки крупной породы не разрешается, поскольку у автомобильного перевозчика, представленного в лице водителя автобуса, нет возможности проконтролировать наличие намордника на собаке, а также наличие жетона и свидетельства с отметкой о прививке собаки от бешенства. Также запрещается перевозка собаки крупной породы в маршрутных такси (из-за стесненности в салоне) и при международных перевозках без согласия перевозчика.

Положения Правил, касающиеся перевозки собак, основываются на результатах анкетирования, которое было проведено среди различных социальных групп (рабочие, служащие, студенты). Число экспертов — 40.

В обязанности пассажира включена оплата за провоз собаки крупной породы в размере перевозки крупномерного багажа. При разрешенной перевозке собаки или кошки установлена обязанность пассажира обеспечить наличие жетона и регистрационного свидетельства животного с отметкой ветеринарного врача о вакцинации против бешенства, а в установленных случаях — ветеринарного свидетельства или ветеринарной справки.

Правилами установлено, что водитель обязан проходить перед рейсом, а при необходимости, во время и (или) после окончания рейса, медицинское освидетельствование с отметкой в путевом листе. Дополнительно установлены требования к водителю легкового автомобиля, используемого в качестве маршрутного такси. Он должен быть не моложе 21 года и иметь: водительское свидетельство (удостоверение) категории «В», стаж управления автомобилями не менее трех лет или стаж работы в качестве водителя не менее одного года.

Правилами не допускается переполнение салона и багажного отделения сверх установленной нормы для конкретного типа пассажирского транспортного средства.

Для повышения выручки от перевозок багажа Правила разрешают при наличии возможности перевозку крупномерного багажа на особых условиях

(повышенная оплата, участие пассажира в укладке и извлечении багажа из багажного отсека). Предусматривается необходимость объема багажного отделения автобуса, выполняющего междугородные перевозки в регулярном сообщении не менее 0,1 куб. и международные перевозки не менее 0,15 куб. м.

В новой редакции правил не делается запрещение на перевозку крупногабаритных мест багажа (ручной клади), если такая перевозка возможна по техническим параметрам автомобиля-такси.

Для повышения эффективности перевозок и снижения вероятности в отказе пассажиру в перевозке из-за отсутствия мест, автобус для международных перевозок в регулярном сообщении должен иметь число пассажирских мест для сидения — не менее 24.

Правила предусматривают применение электронных билетов-карт, что позволит сократить безбилетный проезд и автоматически получать статистическую информацию по работе автобусов и на ее основе совершенствовать организацию перевозок пассажиров.

Разработанная редакция Правил автомобильных перевозок пассажиров позволит улучшить качество обслуживания пассажиров, повысить безопасность и эффективность работы автомобильных перевозчиков.

УДК 004.8: 629.11

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ АДАПТИВНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ РЕЖИМАМИ АВТОМОБИЛЯ

Тарасик В.П., Рынкевич С.А.

*Могилевский государственный технический университет
Могилев, Беларусь*

В реальных условиях эксплуатации автомобиля его потенциальные свойства не используются в полной мере, что снижает эффективность. Это объясняется влиянием окружающей среды, создаваемыми этой средой помехами, а также несовершенством систем управления, в том числе автоматических и автоматизированных систем. Автоматизация управления позволяет в значительной степени улучшить показатели эффективности автомобиля, однако, как показывает практика, полный учет всевозможных факторов могут обеспечить лишь адаптивные системы. При этом возникает необходимость исследования физических свойств объекта управления, внешней среды и человека как неотъемлемого звена автоматизированной системы управления

(АСУ). АСУ призваны принимать правильные решения по управлению энергетическими режимами автомобиля и обеспечивать его безопасность, устойчивость, управляемость. Для этого АСУ должны использовать большой объем информации, обрабатывать эту информацию в реальном режиме времени и обладать свойствами, присущими логическому мышлению человека. Такие системы называют интеллектуальными системами управления (ИСУ). При их создании возникают проблемы разработки методики синтеза алгоритмов и программного обеспечения.

Решение указанных проблем осуществлялось на основе использования принципов теории искусственного интеллекта (ТИИ) и теории нечетких множеств (ТНМ). Для этого была разработана методика, включающая несколько этапов. На первом этапе на основе математического моделирования движения автомобиля получают ядро алгоритма, представляющее собой базовые характеристики управления для типового режима функционирования автомобиля. Эти характеристики составляют основную программу управления энергетическими режимами и являются оптимальными по тем или иным критериям, например, по критерию динамичности, обеспечивающему максимальные показатели приемистости при разгоне автомобиля, или по экономическому критерию, обеспечивающему минимальный расход топлива. Полученные базовые характеристики на втором этапе синтеза адаптивного алгоритма подвергаются корректировке.

В процессе имитационного моделирования автомобиль рассматривается как система с сосредоточенными параметрами, функционирующая в условиях внешней среды, оказывающей многофакторные случайные воздействия. Физические свойства объекта автоматизации описываются системой обыкновенных нелинейных дифференциальных уравнений. Сложность теоретической математической модели не годится для использования в качестве алгоритма работы контроллера системы управления. Поэтому для построения алгоритма функционирования АСУ, оценки показателей качества и эффективности автомобиля целесообразно использовать экспериментальные факторные модели. Их получают на основе теории планирования эксперимента. При этом проводится планируемый вычислительный эксперимент на основе теоретической математической модели. В результате получают регрессионные модели, связывающие критерии оптимальности с управляемыми параметрами. В качестве управляемых параметров, варьируемых в процессе эксперимента, принимаются скорости автомобиля, при которых переключают передачи, и параметры воздействия водителя на органы управления двигателем и трансмиссией. Имитируется движение в типовых дорожных условиях, характерных для исследуемого автомобиля. По полученным

регрессионным моделям производится оптимизация характеристик АСУ по выбранному критерию. Эти характеристики составляют базовую программу ИСУ. На следующем этапе синтеза формируют адаптивный алгоритм. Здесь базовую программу управления трансформируют, наполнив ее интеллектуальными качествами и наделив способностью принимать решения, свойственные логике мышления человека. Адаптация алгоритма к реальным условиям движения осуществляется на основе большого объема информации. При этом учитываются следующие факторы: параметры характеристик дорожных условий; внезапные препятствия движению, обусловленные внешней средой и объектами транспортного потока; нештатные и опасные дорожные ситуации; особенности управления автомобилем, обусловленные стилем вождения; уровень загрузки автомобиля; параметры скоростных режимов движения; реакции автомобиля на управляющие воздействия; допустимые скоростные и нагрузочные режимы работы двигателя и механизмов трансмиссии; пределы безопасных режимов движения в реальных дорожных условиях. Собираемую информацию отображают соответствующими информационными переменными, которые в адаптивном алгоритме представляются в виде нечетких множеств и описываются функциями принадлежности.

Затем составляются и формализуются производственные правила. На их основе осуществляется оценка влияния различных факторов на необходимость корректировки базовой программы и формируется однозначный управляющий сигнал на основе процедуры дефазификации. Полученный алгоритм реализуется в виде программы для контроллера АСУ. Использование принципов ТИИ позволяет создать простой алгоритм работы контроллера системы управления, обеспечивающий высокое быстродействие и функционирование в режиме реального времени.

В Могилевском государственном техническом университете проводятся разработки и исследования ИСУ энергетическими режимами двигателя и трансмиссии карьерных автосамосвалов БелАЗ грузоподъемностью 55 и 135 т и городского автобуса МАЗ полной массой 18 т и вместимостью 100 человек. Эти автомобили оснащены дизельными двигателями и гидромеханическими трансмиссиями.

Исследования по выбору структуры ИСУ и алгоритма ее функционирования проводились путем математического моделирования процессов движения автомобилей по типовым маршрутам. Для автосамосвала выбран 3-километровый маршрут карьера ПО «Гранит» г. Микашевичи с максимальными уклонами 8%, в котором эксплуатируются автомобили данного типа, а для городского автобуса — типовой городской маршрут длиной 6800 м, включающий участки дороги с различными характеристиками, остановки и административ-

ные ограничения. Маршруты представлены в виде совокупности участков, каждый из которых характеризуется продольным уклоном и радиусом кривизны. Выбраны следующие информационные переменные: скорость v и ускорение \dot{v} автомобиля, положения педалей акселератора γ а и тормоза γ т и скорости их изменения $\dot{\gamma}$ а и $\dot{\gamma}$ т, номер N включенной передачи, величина продольного уклона h . Информационные переменные γ а и γ т описаны с помощью линейных функций принадлежности предпосылок, $\dot{\gamma}$ а, $\dot{\gamma}$ т, \dot{v} и h — с помощью S-образных функций. В качестве функций принадлежности заключений, характеризующих программные значения переключений на высшие и низшие передачи, приняты L-образные функции. Каждая такая функция имеет по три лингвистических переменных, характеризующих ранние, средние и поздние переключения. Обработка переменных осуществлялась 30 продукционными правилами, наделяющими алгоритм свойством адаптивности и позволяющими одновременно учесть изменение большого количества информации. Для формирования управляющих сигналов на переключение передач использовалась нечеткая модель, реализующая метод Мамдани.

На рис. 1 представлено графическое описание функциями принадлежности нечетких множеств CP «нажатие на педаль» («clicking a pedal») (а) и PCP «темп нажатия на педаль» («pace of clicking on a pedal») (б). Они характеризуют стиль вождения. Первая функция принадлежности (CP) имеет две лингвистические переменные: «g» и «s» (слабое и сильное нажатие — gentle and strong clicking), а вторая (PCP) — три: «f», «sl» и «vs» (быстро, медленно и очень медленно — fast, slowly and very slowly). Аналогично описываются остальные информационные переменные. Нечеткое множество CP характеризует степень воздействия водителя на педаль акселератора или тормоза. Нечеткое множество PCP характеризует темп нажатия на ту или иную педаль, что выражает быстроту реакции водителя на изменение дорожной обстановки или определяет стиль вождения.

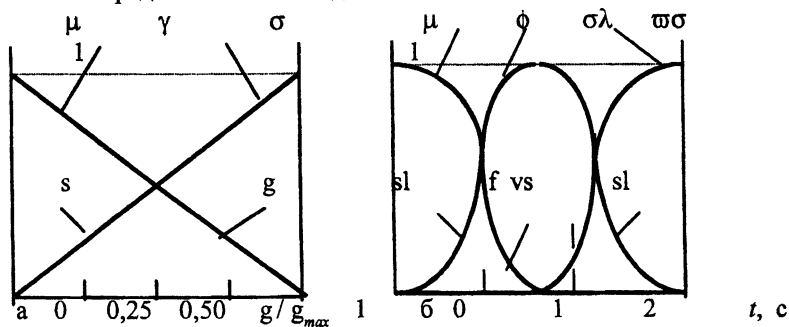


Рис. 1. Нечеткие множества: а — CP ; б — PCP

На рис. 2 в качестве примера представлены графики, имитирующие процессы разгона и замедления автобуса по городскому маршруту с переключением передач $I \rightarrow II \rightarrow III \rightarrow IV \rightarrow III \rightarrow II \rightarrow I$ (v — скорость автобуса, N — номер включенной передачи) и графики изменения сформированных управляющих сигналов переключения на высшие Z_01/Z_p и низшие Z_02/Z_p передачи (базовое программное значение Z_p принято равным 1). Анализ графиков показывает, что при движении автомобиля происходит непрерывное изменение во времени значений управляющих сигналов Z_01/Z_p и Z_02/Z_p . Это открывает огромные возможности по адаптации синтезированных алгоритмов управления к реальным условиям, если настроить контроллер на управление в режиме реального времени. Аналогичные процессы прослеживаются при движении большегрузного автомобиля.

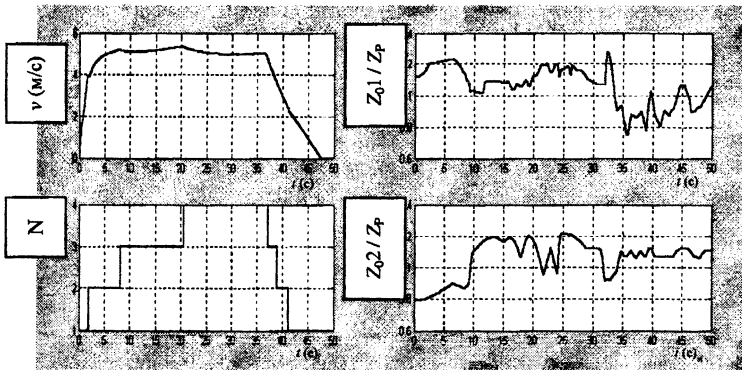


Рис. 2. Графики, имитирующие процессы разгона и замедления автобуса по маршруту

Для оценки эксплуатационной эффективности автомобилей при движении по маршрутам использованы следующие критерии: средняя скорость движения, средний путевой расход топлива на маршруте и удельная производительность. Произведено по несколько заездов по маршруту с управлением по базовым неадаптивным характеристикам и с управлением, наделенным интеллектуальными свойствами. В процессе исследований была оценена эффективность ИСУ. Установлено, что при интеллектуальном адаптивном управлении автомобилями на маршруте по сравнению с управлением по программе, не обладающей адаптивными свойствами, наблюдается улучшение основных эксплуатационных параметров. Средний путевой расход топлива у автобуса снижается на 8–9% и у автосамосвала на 6%, удельная производи-

тельность автобуса возрастает на 9–10%, автосамосвала на 12%. Средняя скорость большегрузного автомобиля возрастает на 5–6 %. Это обусловлено своевременным текущим смещением программных значений на переключение передач в зависимости от изменения фаз движения (разгона, замедления), значений ускорения автомобиля, продольного уклона дороги и управляющих воздействий водителя.

Разработанная методика синтеза и комплекс проведенных исследований использованы при создании адаптивных алгоритмов ИСУ энергетическими режимами упомянутых выше автомобилей.

УДК 629.4.082.25

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ДИЗЕЛЬНОГО ТОПЛИВА В ЛОКОМОТИВНОМ ДЕПО

Френкель Б.С.

*Белорусский государственный университет транспорта
Гомель, Беларусь*

Одной из важных проблем стоящих перед железнодорожным транспортом является экономия топливных ресурсов. Решению этой проблемы в частности способствует внедрение более совершенных систем учета топлива в локомотивном хозяйстве. В связи с этим возникает потребность в оценке эффективности той или иной системы учета, как с технической, так и с экономической точки зрения. Для такой оценки необходимо иметь точную информацию о наличии топлива на складе и в баке каждого тепловоза в любой момент времени, а также о количестве топлива, выданного на пунктах экипировки. Получить такую информацию в реальных условиях эксплуатации практически невозможно из-за погрешностей.

Автором на кафедре «Тепловозы и тепловые двигатели» БелГУТа разработана математическая модель движения топлива в локомотивном хозяйстве, которая позволяет решать задачи, связанные с оценкой и выбором методики и средств измерения количества топлива и его учета. Структурно модель подразделяется на три части: подсистема работы резервуаров топливного склада, подсистема работы пункта экипировки и подсистема расхода топлива тепловозами. В модели организованы два параллельных потока с измерительной информацией: поток фактических значений, которые невозможно установить на реальном объекте и поток измеренных значений с уче-

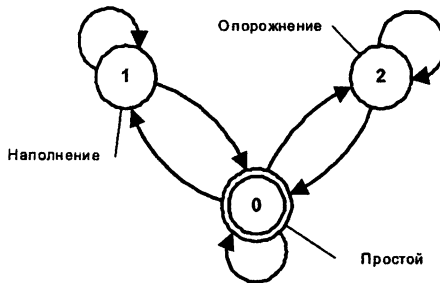
том погрешностей. Принято, что все погрешности в модели подчиняются нормальному закону распределения с параметрами, задаваемыми для каждого модельного эксперимента.

Модель движения топлива реализована, как имитационная дискретно-детерминированная, основанная на событийном методе. В моделях такого типа время t является дискретной переменной: $t = tD$, где D — шаг дискретизации, а $t = 0, 1, 2, \dots$ — «дискретное время».

Рассмотрим подробнее каждую из подсистем

Подсистема работы резервуаров топливного склада

Каждый резервуар топливного склада может находиться в одном из трех состояний: наполнение, опорожнение и простой. Переходы между этими состояниями описываются графом, приведенным на рис. 1.



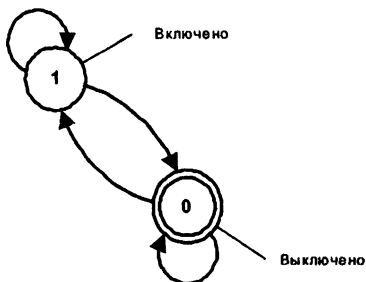
Если на топливном складе находится два резервуара с дизельным топливом, то их работа организуется следующим образом. В то время как один резервуар пополняется, топливо из другого — расходуется на экипировку дизельного подвижного состава и выдачу прочим потребителям дизельного топлива. После опорожнения второго резервуара он переключается на наполнение, а первый — переключается на выдачу потребителям. При наличии на топливном складе более чем двух резервуаров работа организуется таким образом, что часть резервуаров пополняется топливом, а из остальных резервуаров топливо расходуется на пунктах экипировки.

Рассмотрим систему с двумя резервуарами. Исходным для каждого резервуара является состояние «0» (Простой) вне зависимости от того используется резервуар на наполнение или на опорожнении. В этом состоянии количество топлива в резервуаре остается неизменным. Если резервуар используется на опорожнение, то при включении насоса на пункте экипировки он переводится в состояние «2» (Опорожнение) и находится в нем до тех пор, пока экипируется топливом хотя бы один тепловоз, после чего возвращается в состояние «0». В этом состоянии количество топлива в резервуаре уменьшается с каждым

шагом модельного времени на величину, определяемую насосом раздаточной колонки и количеством одновременно работающих колонок. В случае если количество топлива в резервуаре достигает определенного минимального значения (m_p^{min}), резервуар переключается для наполнения, оставаясь, тем не менее, в состоянии «0». Пополнение резервуаров дизельным топливом производится с задаваемой периодичностью. Переход резервуара в состояние «1» (Наполнение) происходит в случае постановки под слив одной или нескольких цистерн с дизельным топливом. В этом состоянии количество топлива в резервуаре увеличивается на каждом шаге модельного времени на величину, определяемую сливным насосом или производительностью сливной эстакады в случае опорожнения цистерн самотеком. Возврат в состояние «0» происходит после слива топлива из всех цистерн. Резервуар работает на наполнение до тех пор, пока количество топлива в нем не достигнет определенного максимального значения (m_p^{max}). Переход к работе на опорожнение происходит в случае переключения второго резервуара для наполнения.

Подсистема работы пункта экипировки

Каждая раздаточная колонка на пункте экипировки может находиться в одном из двух состояний: включено или выключено. Переходы между этими состояниями описываются графом, приведенным на рис. 2.

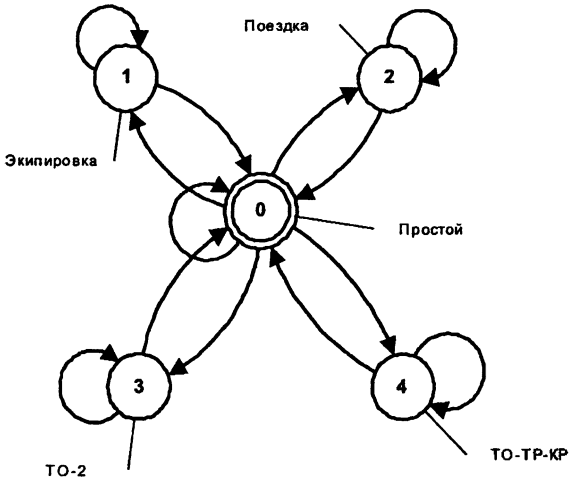


Исходным состоянием для каждой колонки является состояние «0» (Выключено). В этом состоянии показания счетчика колонки не изменяются. Переход в состояние «1» (Включено) происходит при постановке на экипировку тепловоза. В этом состоянии показания счетчика колонки увеличиваются с каждым шагом модельного времени на величину, определяемую производительностью насоса колонки. Возврат в состояние «0» происходит при окончании экипировки тепловоза дизельным топливом.

Подсистема расхода топлива тепловозами

Любой тепловоз в каждый момент времени может находиться в одном из пяти состояний: простой в депо, поездка, экипировка топливом, техниче-

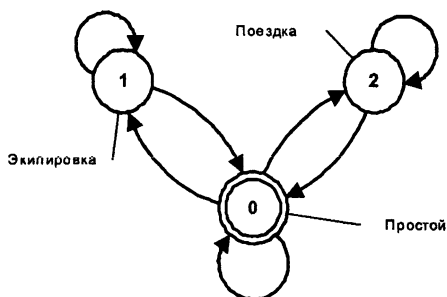
кое обслуживание ТО-2 и техническое обслуживание или ремонт отличные от ТО-2 (ТО-3, ТР-1, ТР-2, ТР-3 и КР-1). На графе состояний тепловозов, изображенном на рис. 3 показаны все состояния тепловозов и возможные варианты переходов между ними.



Любой вид ремонта или ТО для модели будет представлен как простой локомотива в течение определенного времени. Таким образом, это состояние можно объединить с состоянием простоя. Состояние ТО-2 представляет собой такой же простой, отличающийся лишь тем, что во время него экипировка тепловоза топливом производится непосредственно на участке ТО-2. Состояние ТО-2 целесообразно объединить с состоянием экипировки, а в исходных данных для модели в число раздаточных колонок включать как колонки, находящиеся на пункте ТО-2, так и вне его. Учитывая эти изменения, граф состояний тепловозов приобретет следующий вид (рис. 4).

Исходным состоянием для каждого тепловоза является «0» (Простой). В этом состоянии количество топлива в баке не изменяется. Переход в состояние «1» (Экипировка) происходит при необходимости отправления тепловоза в поездку и количестве топлива в баке меньше минимально допустимого значения (m_{Δ}^{min}). В этом состоянии количество топлива в баке увеличивается на каждом шаге модельного времени на величину, определяемую производительностью раздаточной колонки. Экипировка дизельным топливом производится до тех пор, пока количество топлива в баке тепловоза не достигнет определенного максимального значения (m_{Δ}^{max}) после чего происходит возврат в состояние

«0». Необходимость отправки тепловоза в поездку определяется случайным образом. Тепловозы уходят в поездку и остаются в депо с вероятностью равной 0,5. Переход в состояние «2» (Поездка) осуществляется при необходимости отправки тепловоза в поездку и если количество топлива в баке больше или равно минимально допустимому значению (m_E^{min}). Количество топлива в баке в состоянии «2» уменьшается в соответствии с моделью расхода топлива, которая построена на основании данных регрессионного анализа маршрутных листов машиниста по исследуемому депо. Возврат в состояние «0» происходит с прибытием тепловоза на станцию назначения. В модели принято, что экипировка тепловоза дизельным топливом производится только в основных депо.



Выходными данными для модели движения дизельного топлива являются две базы данных. В первой содержится информация о выполненных поездках (маршрутные листы машиниста). Вторая база данных содержит значения количества топлива на складе, количества топлива выданного через каждую раздаточную колонку и количества топлива в баке каждого локомотива, зафиксированные с заданной периодичностью. В модели фиксируются как фактические, так и измеренные значения количества топлива. Это позволяет оценить, как влияет погрешность измерения на каждом из этапов работы топливного хозяйства на точность измерительной информации в системе учета в целом.

Исследования модели и сопоставление результатов моделирования с данными о реальных поездках показали адекватность результатов, полученных на модели, данным из маршрутных листов.

Представленная модель используется для исследований, направленных на совершенствование системы измерения и учета дизельного топлива. Эти исследования проводятся с использованием метода топливных балансов. Используя метод балансов, можно выявить «узкие места» т.е. те места, где совершенствование системы измерения и учета дизельного топлива наиболее актуально, а, следовательно, может дать наибольший эффект.

ЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.311.017

ОБ ОПТИМИЗАЦИИ РАЗОМКНУТЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ ПО ДИСКРЕТНЫМ ПАРАМЕТРАМ

Фурсанов М. И.

*Белорусский национальный технический университет**Минск, Беларусь*

Разработана алгоритмизированная методика оптимизации разомкнутых электрических сетей по основным дискретным параметрам (сечениям проводов \bar{X}_1 , номинальным мощностям трансформаторов \bar{X}_2 и компенсирующим устройствам \bar{X}_3) с целью приближения фактических уровней технических потерь электроэнергии в электрических сетях к оптимальным по экономическому критерию [1–4]. Задача относится к многомерным задачам дискретного программирования. В качестве критерия оптимальности принят минимум суммарных затрат:

$$Z = Z(\bar{X}, t) \rightarrow \min, \quad (1)$$

где
$$\bar{X} = \{\bar{X}_1, \bar{X}_2, \bar{X}_3\}, \quad (2)$$

$$\bar{X}_1 \in \Omega_1, \bar{X}_2 \in \Omega_2, \bar{X}_3 \in \Omega_3, \quad (3)$$

\bar{X}_1 – вектор сечений проводов: $\bar{X}_1 = \{F_1, F_2, \dots, F_n\}$, (4)

\bar{X}_2 – вектор дискретных значений номинальных мощностей трансформаторов:

$$\bar{X}_2 = \{S_1, S_2, \dots, S_n\}, \quad (5)$$

\bar{X}_3 – вектор мощностей компенсирующих устройств

$$\bar{X}_3 = \{Q_1, Q_2, \dots, Q_n\}. \quad (6)$$

При решении задачи учитываются ограничения по потерям напряжения, току нагрева и допустимой перегрузке элементов сети:

$$\bar{g}_i = \bar{g}_i(\bar{X}_1, \bar{X}_2, \bar{X}_3) \quad \{\leq, =, >\} b_i, \quad (7)$$

где $i \in \bar{1}, k, k = n + m + l$.

Структурная схема разработанного алгоритма содержит следующие основные блоки:

1. Рассчитывается исходный режим сети и определяется начальное значение минимизируемой целевой функции $Z = Z(\bar{X}^{(0)})$. Начальное прибли-

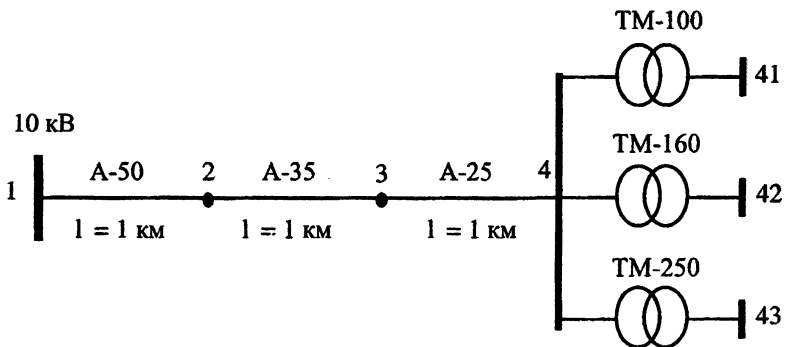
жение вектора $\bar{X} = \bar{X}^{(0)}$ представляет собой имеющиеся в сети сечения проводов, номинальные мощности трансформаторов и компенсирующих устройств.

2. Для каждого из подлежащих оптимизации участка сети определяются коэффициенты эластичности. Предварительный отбор участков сети целесообразно проводить с целью понижения общей размерности задачи и временных затрат. Это будут, в основном, головные участки линий, узлы с пониженными уровнями напряжений и недогруженные трансформаторы.

3. Рассчитанные коэффициенты ранжируются по абсолютной величине и для участка сети с максимальным коэффициентом эластичности отыскивается новое значение оптимизируемого параметра X_i^1 , для которого с учетом дискретности шкалы $\partial Z / \partial x_i^{(1)} \approx 0$ и выполняются технические ограничения. Поскольку при дискретном изменении \bar{X} обращение $\partial Z / \partial X$ в нуль маловероятно, то новое значение i -й переменной, минимизирующее Z , находится путем последовательных расчетов с шагом ΔX_i .

4. После оптимизации одного параметра пункты 1 + 3 алгоритма повторяются до выполнения условия $\partial Z / \partial x_i \approx 0$ для всех отмеченных участков сети. Перерасчет режима сети осуществляется только в той части схемы сети в которой происходят изменения.

С использованием базовых положений алгоритма разработана соответствующая компьютерная программа, позволяющая получить графическую интерпретацию схемы сети до и после оптимизации. Результаты расчета схемы контрольного примера приведены ниже.



Исходные данные:

Максимальная загрузка трансформаторов 15%, $t = 1500$ ч, $T_{\text{ма}} = 3400$ ч, $\cos j = 1$, $b_n = 0.032$ руб/кВт·ч, $b_o = 0.016$ руб/кВт·ч, $p_r = 0.254$.

Расчет исходного режима сети

Данные и некоторые результаты расчета исходного режима сети (нагрузки участков и потери активной мощности) приведены в табл. 1.

Таблица 1

Данные и результаты расчета исходного режима сети

Уча- сток	Марка	Загруз- ка, %	На- грузка, кВ·А	Актив- ное со- против- ление, Ом	Потери мощно- сти, кВт		
					нагр.	х.х.	
1-2	A-50	–	76.5	0.576	0.034	–	
2-3	A-35	–	76.5	0.830	0.049	–	
3-4	A-25	–	76.5	1.140	0.067	–	
4-41	ТМ-100	15	15.0	22.700	0.051	0.33	
4-42	ТМ-160	15	24.0	10.400	0.059	0.51	
4-43	ТМ-250	15	37.5	6.700	0.094	0.74	
Итого:						0.354	1.58

Суммарные нагрузочные потери электроэнергии ΔW_n составляют:

$$\Delta W_n = 0,354 \cdot 1500 = 531,00 \text{ кВт}\cdot\text{ч.},$$

потери холостого хода ΔW_{xx} в трансформаторах:

$$\Delta W_{xx} = 1,58 \cdot 8760 = 13840,80 \text{ кВт}\cdot\text{ч.}$$

Поток электроэнергии $W_{гy}$ на головном участке схемы:

$$W_{гy} = P_{\text{макс гy}} \cdot T_{\text{ма}} + \Delta W_n + \Delta W_{xx} = 76,5 \cdot 3400 + 531,00 + 13840,80 = 274471,80 \text{ кВт}\cdot\text{ч.}$$

Потери электроэнергии в процентах:

$$\Delta W_{n\%} = (531,00 / 274471,8) \cdot 100 = 0,19\%,$$

$$\Delta W_{xx\%} = (13840,8 / 274471,8) \cdot 100 = 5,04\%,$$

$$\Delta W_{a\%} = 0,19 + 5,04 = 5,23\%.$$

Расчет оптимального режима сети при оптимальной нагрузке трансформаторов 100, 160 и 250 кВА

Оптимальная нагрузка трансформаторов с учетом изменения потерь энергии на линейных участках схемы определяется по формуле:

$$k_{C_T} = \sqrt{\frac{p_r K_r + \Delta P_0 T \beta_0}{\Delta P_{ca} \tau_r \beta_n + \sum \frac{S_{\text{НОМ}}^2}{U^2} r_{лi} \tau_n \beta_n}}$$

Имеем:

$$k_{Cm}^{100} = \sqrt{\frac{0.254 \cdot 570 + 0.33 \cdot 8760 \cdot 0.016}{2.27 \cdot 1500 \cdot 0.032 + [100^2/10^2 \cdot (0.576 + 0.83 + 1.14) \cdot 1500 \cdot 0.032] / 1000}} = 0.859,$$

$$k_{Cm}^{160} = \sqrt{\frac{0.254 \cdot 740 + 0.51 \cdot 8760 \cdot 0.016}{2.65 \cdot 1500 \cdot 0.032 + [160^2/10^2 \cdot (0.576 + 0.83 + 1.14) \cdot 1500 \cdot 0.032] / 1000}} = 0.712,$$

$$k_{Cm}^{250} = \sqrt{\frac{0.254 \cdot 1000 + 0.74 \cdot 8760 \cdot 0.016}{4.2 \cdot 1500 \cdot 0.032 + [250^2/10^2 \cdot (0.576 + 0.83 + 1.14) \cdot 1500 \cdot 0.032] / 1000}} = 0.560$$

Оптимальные потери в схеме при оптимальной загрузке трансформаторов (85.9, 71.2 и 56.0%) приведены в табл. 2.

Таблица 2

Данные и результаты расчета оптимального режима сети

Участок	Марка	Загрузка, %	Нагрузк а, кВ·А	Активное сопротивление, Ом	Потери мощности, кВт	
					нагр.	х.х.
1-2	А-50	—	339.82	0.576	0.67	—
2-3	А-35	—	339.82	0.830	0.96	—
3-4	А-25	—	339.82	1.140	1.32	—
4-41	ТМ-100	85.9	85.90	22.700	1.67	0.33
4-42	ТМ-160	71.2	113.92	10.400	1.35	0.51
4-43	ТМ-250	56.0	140.00	6.700	1.31	0.74
Итого:					7.28	1.58

Обобщенные результаты расчета:

$$\Delta W_n = 7.28 \cdot 1500 = 10920.00 \text{ кВт·ч,}$$

потери холостого хода в трансформаторах:

$$\Delta W_{xx} = 1.58 \cdot 8760 = 13840.80 \text{ кВт·ч.}$$

Поток электроэнергии на головном участке схемы:

$$W_{гy} = P_{\text{макс гу}} T_{\text{ма}} + \Delta W_n + \Delta W_{xx} = 339.82 \cdot 3400 + 10920.00 + 13840.80 = 1180148.80 \text{ кВт·ч.}$$

Потери электроэнергии в процентах:

$$\Delta W_{н\%} = (10920/1180148.80) \cdot 100 = 0.92\%,$$

$$\Delta W_{хх\%} = (13840.8/1180148.80) \cdot 100 = 1.17\%,$$

$$\Delta W_{а\%} = 0.92 + 1.17 = 2.09\%.$$

Вывод: при оптимальной загрузке трансформаторов, установленных в сети, потери электроэнергии в схеме снижаются с 5.23 до 2.09%, т.е. более чем в два раза.

Расчет оптимального режима сети после замены трансформаторов 100, 160 и 250 кВ·А на 25, 25 и 40 кВ·А, найденных по разработанной методике на основе анализа матрицы чувствительности

Таблица 3

Данные и результаты расчета оптимального режима сети

Уча- сток	Марка	Загруз- ка, %	На- грузка, кВ·А	Активное сопро- тивление, Ом	Потери мощ- ности, кВт	
					нагр.	х.х.
1-2	А-50	–	76.5	0.576	0.034	–
2-3	А-35	–	76.5	0.830	0.049	–
3-4	А-25	–	76.5	1.140	0.067	–
4-41	ТМ-25	60	15.0	22.700	0.248	0.130
4-42	ТМ-25	96	24.0	10.400	0.634	0.130
4-43	ТМ-40	94	37.5	6.700	0.879	0.175
Итого:					1.909	0.435

Обобщенные результаты расчета:

$$\Delta W_{н} = 1.909 \cdot 1500 = 2863.50 \text{ кВт·ч,}$$

потери холостого хода:

$$\Delta W_{хх} = 0.435 \cdot 8760 = 3810.60 \text{ кВт·ч.}$$

Поток электроэнергии на головном участке:

$$W_{г\text{у}} = P_{\text{макс г\text{у}}} \cdot T_{\text{ма}} + \Delta W_{н} + \Delta W_{хх} = 76.5 \cdot 3400 + 2863.50 + 3810.60 = 266774.10 \text{ кВт·ч.}$$

Потери электроэнергии в процентах:

$$\Delta W_{н\%} = (2863.50/266774.10) \cdot 100 = 1.07\%,$$

$$\Delta W_{хх\%} = (3810.60/266774.10) \cdot 100 = 1.43\%,$$

$$\Delta W_{а\%} = 1.07 + 1.43 = 2.50\%.$$

Вывод: при замене трансформаторов в сети на оптимальные номиналь-
ные мощности потери электроэнергии в схеме снижаются с 5.23 до 2.50%,

т.е. немногим более, чем в два раза. Рассчитанные оптимальные режимы работы сети (2.09 и 2.50% потерь) близки друг к другу.

Литература

1. Фурсанов М.И. Методология и практика расчетов потерь электроэнергии в электрических сетях энергосистем. - Минск: Тэхналогія, 2000.- 247 с.
2. Фурсанов М. И., Макаревич В.В. Об оптимальных уровнях потерь в электрических сетях 6...20 кВ // Энергосбережение. Электроснабжение. Автоматизация: Материалы науч.-техн. конф. – Гомель, 2001. – С. 27–29.
3. Фурсанов М. И., Макаревич В.В., Фурсанова В.М. Оптимальная нагрузка силовых трансформаторов // Актуальные проблемы электроэнергетики: Тез. докл. науч. конф. – Минск, 2001. – С. 7.
4. Фурсанов М. И., Макаревич В.В. Методика и программа построения оптимальной разомкнутой электрической сети // Новые математические методы и компьютерные технологии в проектировании, производстве и научных исследованиях: Тез. докл. науч. конф. – Гомель, 2001. – С. 198-199.

УДК 621.311.017

ДЕТЕРМИНИРОВАННЫЕ РАСЧЕТЫ И АНАЛИЗ РЕЖИМОВ И ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ 6-20 КВ

Фурсанов М. И.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

Детерминированные (позлементные) методы оценки потерь электроэнергии предназначены для определения величины технических потерь на участках распределительных линий (линейных и трансформаторных) и ориентированы на использование детализированной сетевой и режимной исходной информации. Для обеспечения качественныхazoleментных расчетов требуются режимные данные по одновременно снятым нагрузкам понижающих трансформаторных подстанций 6–20/0,38 кВ, что возможно только при оснащении всех ТП современными устройствами телемеханики.

В настоящее время из-за огромных финансовых затрат это практически невозможно, поэтому всеazoleментные методики расчета потерь в какой-то мере являются приближенными и базируются на тех или иных допущениях.

Из режимной информации в распределительных электрических сетях 6–20 кВ можно рассчитывать на значения напряжений, токов и потоков электроэнергии на головных участках распределительных линий и нагрузки ТП, которые могут отсутствовать, быть заданными частично или по всем ТП. По потребительским линиям и подстанциям, как правило, известен расход электроэнергии за расчетный период времени.

Учитывая, что некоторые из перечисленных режимных данных могут отсутствовать, предложено несколько возможных вариантов поэлементных расчетов потерь /1, с. 69–72/.

Вариант 1. Базовым (основным) вариантом расчета служит вариант, когда одновременно задаются ток и поток энергии на головном участке распределительной линии и режимная информация по всем нагрузочным узлам (нагрузки ТП). В силу того, что максимальные нагрузки ТП разнесены во времени, рассчитать потокораспределение в схеме линии простым суммированием токов по первому закону Кирхгофа не представляется возможным, поскольку расчетный ток на «головном» участке линии будет отличаться от замеренного, например, в максимум энергосистемы. Методика предлагает следующий способ уточнения режимных характеристик распределительных сетей 6–20 кВ. В основу определения потокораспределения положена итерационная процедура расчета режима сети, основанная на достижении балансов между расчетными (вычисленными аналитическим путем) и замеренными (фактическими) значениями токов и потоков энергии на «головных» участках линий. Балансы (в пределах заданной точности расчета) достигаются за счет корректировки (увеличения или уменьшения) первоначально заданных значений токов и потоков энергии по ТП.

Рассмотрим описанную процедуру на примере уточнения нагрузок максимальных токов по понижающим трансформаторным подстанциям 6–20/0,38 кВ распределительной линии:

1. Вычисляем разность ΔI между замеренным $I_{\text{фгу}}$ (взятым из режимной ведомости) и расчетным $I_{\text{ргу}}$ (вычисленным по первому закону Кирхгофа по заданным нагрузкам ТП с учетом неодновременности снятия нагрузок) тока на «головном» участке линии:

$$\pm \Delta I = I_{\text{фгу}} - I_{\text{ргу}}$$

2. Определяем величину этой разности в процентах:

$$\Delta I_{\%} = \frac{|\pm \Delta I|}{I_{\text{фгу}}} 100\%$$

3. Сравниваем расчетную величину $\pm \Delta I_{\%}$ с заданной точностью расчета по току $\pm \Delta I_{\text{доп}\%}$: $(\Delta I_{\%} - \Delta I_{\text{доп}\%}) \cdot 0$.

При выполнении данного условия переходим к уточнению потоков энергии. В противном случае уточняем первоначально заданные токовые нагрузки ТП (пункты 4, 5).

4. Приводим величину ΔI к стороне 0,38 кВ с учетом k_T и k_H :

$$\pm \Delta I_{нн} = \frac{\pm \Delta I}{k_m k_n},$$

где k_T — коэффициент трансформации ТП; k_H — коэффициент неодновременности снятия нагрузок.

5. Распределяем величину $\pm \Delta I_{нн}$ пропорционально первоначально заданным токовым нагрузкам ТП I_{cj} . Для этого вначале определяем сумму I_c токов I_{cj} :

$$I_c = \sum_1^m I_{cj}, \quad j = \overline{1, m},$$

а затем для каждого j -о ТП вычисляем откорректированный («новый») ток I_{nj} :

$$I_{nj} = \left| \frac{\pm \Delta I_{нн}}{I_c} I_{cj} + I_{cj} \right|.$$

Корректировка токов (максимальных, средних или других) выполняется один раз и может осуществляться за несколько итераций, после чего аналогичным образом с учетом потерь в сети уточняются потоки энергии.

В ряде случаев сбор нагрузок по понижающим трансформаторным подстанциям — весьма трудоемкая, а иногда и невыполнимая задача. В такой ситуации нагрузки ТП рассчитываются по режимным данным «головного» участка распределительной линии пропорционально номинальным мощностям трансформаторов. При этом возможны следующие основные комбинации.

Вариант 2. Из режимной информации задано только значение $I_{фгу}$. Точные нагрузки ТП неизвестны. Здесь вычисляются

$$I_{nj} = \frac{I_{фгу}}{S_m} S_{nj}, \quad (1)$$

и по ним проводятся поэлементные расчеты потерь. При этом необходимо помнить, что

$$W_{фгу} = P_{\max} T_{ма} = \overline{PT},$$

$$P_{\text{макс}} = \sqrt{3}U_m I_{\text{мфзУ}} \cos \varphi_m,$$

$$\bar{P} = \sqrt{3}\bar{U}\bar{I}_{\text{фзУ}} \cos \bar{\varphi}.$$

Здесь индекс «макс» относится к максимальному режиму; «-» (черточка) к режиму средних нагрузок. В обоих случаях:

$$\Delta W_{\text{ЛН}} = \sum_1^n \Delta W_{\text{ЛН}i},$$

$$\Delta W_{\text{ТН}} = \sum_1^m \Delta W_{\text{ТН}j},$$

$$\Delta W_{\text{ТХ}} = \sum_1^m \Delta W_{\text{ТХ}j}.$$

Для расчета совокупных значений потерь в линии рассчитывается режим сети (в первом варианте после осуществления процедуры уточнения режимной информации), потоки и потери мощности на участках сети. Переход к активным потерям электроэнергии осуществляется: в режиме максимальных нагрузок — по времени потерь t , в режиме средних нагрузок — с использованием коэффициента формы графика нагрузки k_ϕ .

Вариант 3. Заданы значения $I_{\text{фзУ}}$ и k токовых нагрузок ТП $I_{\text{с}j}$. В этом случае будем иметь:

$$I_{\text{кзУ}} = \sum_1^k I_{\text{с}j},$$

$$I_{\text{фзУ}}^p = I_{\text{фзУ}} - I_{\text{кзУ}}$$

$$I_{\text{н}j} = \frac{I_{\text{фзУ}}^p}{S_m} S_{\text{н}j}, \quad j = \overline{k+1, m}.$$

и затем отметим, что для распределительных электрических сетей 6–20 кВ расчет режима можно вести как в токах, так и в мощностях. Другие варианты расчета будут производными от описанных выше.

Разработанная методика алгоритмизирована и реализована в программе DE10 /271, с. 190-198/ предназначенной для поэлементных расчетов потерь мощности и энергии в распределительных линиях 6–20 кВ и подключенных к ним трансформаторах на основе детерминированных исходных данных.

Она применяется при расчете потерь в элементах сети, их анализе, структуризации и прогнозировании, разработке организационно-технических мероприятий по снижению потерь.

В качестве исходной информации используются полные топологические данные о структуре сети — номера начал и концов участков схемы сети с указанием марок проводов (кабелей) участков и номинальных мощностей (типов) трансформаторов, и обязательно режимные показатели. Эти показатели задаются в виде максимальных токов и потоков энергии на «головных» участках распределительных линий и параметров нагрузочных узлов. Нагрузочный узел — это шины вторичного напряжения трансформаторных подстанций (ТП) 6-20/0,38 кВ. Для одного узла необходимо задать его номер и нагрузку (максимальный ток, замеренный в собственный максимум ТП, или отпуск энергии с шин 0.38 кВ), время использования максимальной активной нагрузки и коэффициент мощности потребителя. Если для некоторых ТП нагрузки отсутствуют, то они рассчитываются распределением максимального тока «головного» участка пропорционально номинальным мощностям трансформаторов данной линии.

В результате поэлементного расчета сети определяются: режим сети, потоки и потери мощности на участках (нагрузочные и постоянные), индивидуальные эквивалентные сопротивления и потери электроэнергии по годам расчетного периода.

В итоге имеем: результаты расчета установившегося режима и поэлементных потерь энергии сети (номер начала и конца участка схемы, потоки и потери активной и реактивной мощности и энергии, токовая нагрузка участка, загрузка линейных и трансформаторных ветвей, потери напряжения и напряжения в узлах); результаты расчета потерь энергии и их структура по распределительной линии и ее трансформаторам по годам прогнозируемого периода (расчетный ток и поток энергии на «головном» участке и потери энергии — суммарные, нагрузочные и постоянные в именованных единицах и процентах); обобщенные режимные и топологические характеристики сети — суммарный отпуск энергии, число линейных и трансформаторных участков, протяженность сети, суммарная установленная мощность подключенных трансформаторов и другие.

За основную расчетную единицу принята разомкнутая сеть распределительной линии типа дерево. Расчеты сетей выполняются последовательно, что практически устраняет проблему размерности задачи и позволяет рассчитывать все сети рассматриваемого структурного подразделения.

Режимная информация по нагрузочным узлам может быть задана с погрешностью, поэтому в основу алгоритма программы положен итерацион-

ный расчет режима сети, основанный на достижении балансов между расчетными (найденными в процессе счета) и фактическими (заданными в исходной информации) токами и потоками энергии на «головных» участках распределительных линий.

Алгоритм задачи работает следующим образом. После ввода исходной топологической и режимной информации об одной сети осуществляется семантический контроль данных и по возможности автоматическое исправление типовых ошибок, наиболее часто встречающихся при кодировке исходной информации. К ним относятся – отсутствие источника питания, потеря связности схемы, выход числовых значений характеристик сети (марки и длины провода, установленной мощности трансформатора, токовой нагрузки ТП, времени использования максимальной активной нагрузки и других) за реально существующие пределы. При этом вместо ошибочных данных принимаются их статистические средние, на печать выдаются диагностические сообщения о координатах и характере ошибки и расчет продолжается.

После построения конфигурационной модели сети с использованием ВАО выполняется расчет потокораспределения в схеме и осуществляется проверка небалансов между расчетными и заданными токами и потоками энергии на «головном» участке линии. Если небаланс находится в допустимых пределах, то режимная информация об узлах не содержит погрешностей и расчет по программе продолжается. В противном случае максимальные токовые нагрузки узлов корректируются в требуемую (большую или меньшую) сторону и итерационный расчет продолжается до достижения балансов по токам.

Корректировка токов осуществляется за счет надбавок (положительных или отрицательных), определяемых для каждого ТП по небалансу между максимальными расчетным и заданным токами на «головном» участке линии, распределяемому пропорционально токам ТП, найденным на предыдущей итерации.

1. Фурсанов М.И. Методология и практика расчетов потерь электроэнергии в электрических сетях энергосистем. - Минск: Тэхналогія, 2000.- 247 с.

УДК 621.311

РАСЧЕТЫ ОСНОВНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕЛЕМЕХАНИЧЕСКИХ РЕЖИМНЫХ ДАННЫХ

Золотой А. А.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

В докладе представлена автоматизированная система (АС) управления электрическими сетями напряжением 35 кВ и выше, разработанная в НИЛ «Производство и распределение энергии» Белорусского национального технического университета совместно со специалистами НПФ «Диполь» и внедренная в опытно-промышленную эксплуатацию в Столбцовских электрических сетях РУП «Минскэнерго».

Наряду с традиционными для ОИК функциями сбора, хранения и отображения информации разработанная АС отличается возможностью выполнения электрических расчетов и решением различных режимных задач с использованием реальных телеметрических данных.

Структура АС представлена на рисунке.

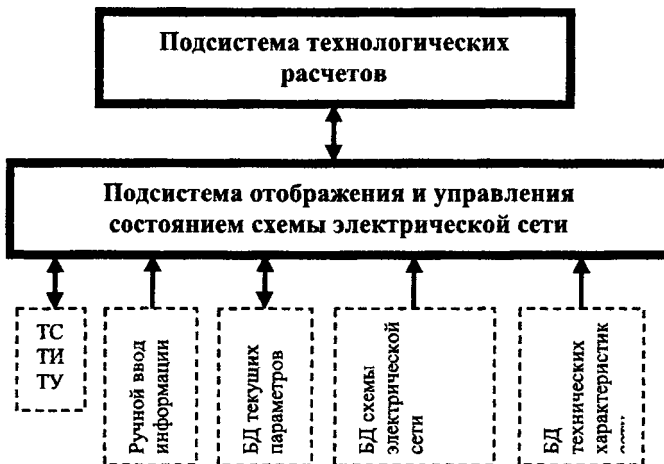


Рис. 1. Структурная схема автоматизированной системы управления состоянием схемы Столбцовских электрических сетей

В основу автоматизированной системы положены три информационные базы данных:

База данных текущих параметров. Формируется на основе информации, поступающей от оборудования подстанций (телесигнализация положения <ТС> и телеизмерения <ТИ>) и от действий эксплуатационного персонала (телеуправление <ТУ>, установка плакатов, заземления и т. д.).

База данных схемы электрической сети. Представляет собой описание и отображение электрических связей всех объектов схемы и их свойств.

База данных технических характеристик сети. Включает в себя паспортные данные всех объектов схемы сети (марки и длины проводов линий, сопротивления трансформаторов и пр.)

Программное обеспечение системы обеспечивает заполнение баз данных и взаимодействие их между собой при реализации различных задач автоматизации, выполняемых соответствующими подсистемами АС. Подсистема отображения и управления состоянием электрической схемы, принимая информацию от телемеханики и оперативного персонала, выполняет ее обработку, отображение на схемах различного уровня детализации и сохранение в базе данных текущих параметров. В базе данных имеется полное описание объектов схемы и их свойств, поэтому программное обеспечение, анализируя положение коммутационных аппаратов, выделяет различными цветами включенные, отключенные и заземленные участки. Для выполнения расчетов подсистема отображения и управления формирует математическую модель схемы электрической сети на данный момент ее состояния и передает в подсистему технологических расчетов. Результаты расчетов отображаются на схеме электрической сети и в табличном виде.

Дополнительно в разработанной АС реализован *режим имитации*, в котором предусмотрена возможность изменения текущих положений коммутационных аппаратов и задание режимных параметров с последующим выполнением расчетов смоделированных режимов. Режим имитации может использоваться для прогнозирования результатов различных переключений, расчета уставок защит, анализа действий персонала в аварийных ситуациях, обучения диспетчеров и др.

Разработанная автоматизированная система позволяет выполнять оперативные расчеты режимов и потерь в реальном времени по данным телеметрии и непрерывно осуществлять диагностику состояния схемы электрической сети. В режиме имитации возможен расчет оптимальной схемы запитки потребителей в ремонтных режимах.

В перспективе предполагается создание полной информационной модели электрической сети РУП «Минскэнерго» путем слияния информацион-

ных баз данных автономных автоматизированных систем электрических сетей и электростанций энергообъединения.

Ниже перечислены основные функции, выполняемые АС.

1. Функции сбора и первичной обработки телеметрической информации, устройств телемеханики:

- прием информации (ТИ и ТС);
- первичная обработка оперативной информации (масштабирование, фильтрация).

2. Функции отображения информации и контроля технологических параметров сети:

- отображение полной схемы или любого участка мнемосхемы с возможностью масштабирования изображения;
- выполнение плавного перемещения (скроллинга) изображения мнемосхемы по всем направлениям (влево, вправо, вниз, вверх);
- многослойное и многоуровневое представление схем электросетей:
- 1-й уровень — общая диспетчерская схема (ДС);
- 2-й уровень — схемы подстанций;
- 3-й уровень — таблицы сигнализации;
- отображение результатов расчетов на ДС;
- режим автоматической защиты экрана, при поступлении любого сообщения экран открывается автоматически;
- отображение цветом участков, находящихся под напряжением;
- отображение цветом отключенных участков;
- отображение цветом заземленных участков;
- отображение различными цветами участков разных уровней номинальных напряжений;
- отображение состояния телемеханизированных объектов:
- включен достоверно;
- отключен достоверно;
- включен недостоверно;
- отключен недостоверно;
- ручной ввод включен;
- ручной ввод отключен;
- ремонтное положение;
- включен испытательный достоверно;
- отключен испытательный достоверно;
- включен испытательный недостоверно;
- отключен испытательный недостоверно.

3. Функции регистрации текущей и аварийной информации:

- вывод предупредительных и аварийных сообщений, сопровождаемых различаемыми звуковыми сигналами;
- цветовое разделение аварийной и предупредительной сигнализации;
- квитирование сообщений;
- настройка ТС на автоматическое квитирование с возможностью просмотра списка сигналов, установленных на автоквитирование.

4. Функции управления:

- формирование и выдача команд непосредственно со схемы на дисплей (с многоступенчатой проверкой и подтверждением);
- настройка парольного права доступа к телеуправлению;
- настройка телеуправляемых объектов на уровень управления диспетчерами РЭС или ЭС с протоколированием в журнале.

5. Функции установки плакатов:

- установка на коммутационных аппаратах плакатов «Не включать! Работают люди» с автоматическим формированием запретов на включение этих аппаратов;
- установка на коммутационных аппаратах плакатов «Не включать! Работа на линии» с автоматическим формированием запретов на включение этих аппаратов;
- установка на объектах плакатов «Работает бригада» с автоматическим учетом количества бригад, работающих на подстанции;
- автоматическое занесение сообщения в журнал о времени и месте установки предупредительных плакатов.

6. Функции регистрации пользователей:

- настройка полномочий диспетчера управления коммутационными аппаратами при приеме и сдаче смены;
- ввод и смену паролей;
- введение секретной клавиши для дачи команды телеуправления;
- автоматическое занесение в журнал событий о смене пользователей.

7. Функции технологических расчетов сетей 35 кВ и выше:

- расчет установившегося режима разомкнутой электрической сети 35 кВ и выше по данным телеметрии с учетом АРН трансформаторов;
- оптимизация коэффициентов трансформации трансформаторов в разомкнутой электрической сети 35 кВ и выше;

- расчет емкостных токов линий 35 кВ;
- расчет токов КЗ в разомкнутой электрической сети 35 кВ и выше;
- расчет точек нормального разрыва в разомкнутой электрической сети 35 кВ и выше.

Для расчетов установившихся режимов разомкнутых электрических сетей 35 кВ и выше в АС был адаптирован алгоритм программного модуля, разработанного для выполнения электрических расчетов режимов основных сетей энергосистем. Данный алгоритм предусматривает решение нелинейных уравнений узловых напряжений, записанных в форме баланса мощностей в декартовом базисе, методом Ньютона по параметру [1-4]. В процессе адаптации алгоритма были выполнены численные исследования сходимости расчетов разомкнутых электрических сетей 35 кВ и выше, а также сетей 10 кВ. В результате проведенных исследований алгоритм показал надежную сходимость и высокую эффективность расчетов установившихся режимов электрических сетей указанного класса. Алгоритм оказался вполне пригодным к использованию в качестве базового средства расчета установившихся режимов разомкнутых электрических сетей 35 кВ и выше в составе разработанной автоматизированной системы.

Литература

1. *Фурсанов М. И., Золотой А. А.* Алгоритм и программа расчета установившихся режимов основных электрических сетей энергосистем. — «Вестник БГПА», 2002, № 1, с. 60 — 63.
2. *Фурсанов М. И., Золотой А. А.* Повышение эффективности расчетов установившихся режимов электрических сетей энергосистем. // В сб.: Актуальные проблемы электроэнергетики: Тезисы докладов научно-технической конференции студентов и аспирантов — Мн.: БНТУ, 2002, с. 7–8.
3. *Золотой А. А.* Расчет установившихся режимов сложноразомкнутых электрических сетей методом Ньютона. // В сб.: Энергосбережение. Электроснабжение. Автоматизация: Материалы международной научно-технической конференции (22–23 ноября 2001 г., г. Гомель). — Гомель: Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», 2001, с. 76–78.
4. *Золотой А. А.* Алгоритмическое и программное обеспечение расчета стационарных режимов сложноразомкнутых электрических сетей методом Ньютона. // В сб.: Материалы международной межвузовской научно-технической конференции студентов, аспирантов и магистрантов. 15–17 мая 2001 года, Гомель: Ризограф ГГТУ, 2001, с. 167–170.

УДК 621.315

ГАШЕНИЕ ПЛЯСКИ РАСЩЕПЛЕННЫХ ПРОВОДОВ КОМБИНИРОВАННЫМИ ГАСИТЕЛЯМИ КОЛЕБАНИЙ

Климкович П.И.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

Пляска проводов характеризуется большими амплитудами и динамическими нагрузками на элементы воздушных ЛЭП. При пляске может происходить схлестывание проводов и повреждение гирлянд и опор, так как она имеет продолжительный характер. Длительно действующие дополнительные нагрузки приводят к усталостным разрушениям проволок в проводе вблизи поддерживающих зажимов. Пляска расщепленных проводов вызывает износ проводов и разрушение распорок. Наиболее актуальными задачами изучения пляски проводов являются определение максимальных амплитуд колебаний, динамических усилий в элементах линий, а также разработка эффективных средств ее подавления. Исследование эффективности механических гасителей пляски проводятся в Бельгии, Дании, Великобритании, Нидерландах, ФРГ, США и Канаде. Например, разработанный в Бельгии новый демпфер пляски расщепленных проводов (TDD) [1] сочетает принципы расстройки маятниковой системой и демпфирования крутильных колебаний.

В докладе излагается численный метод расчета пляски расщепленных проводов с учетом комбинированных гасителей колебаний. Асимметричный гололедный осадок играет основную роль в изменении подъемных сил и моментов, действующих на колеблющиеся провода. Для исследования характеристик пляски использованы уравнения динамики проводов [2] в виде:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 y_c}{\partial t^2} + \frac{\delta}{\rho} \frac{\partial y_c}{\partial t} - h \sin \theta_G \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} - h \cos \theta_G \left(\frac{\partial \theta}{\partial t} \right)^2 &= \frac{1}{\rho} \left(T \frac{\partial^2 y_c}{\partial s^2} + P_y \right); \\ \frac{\partial^2 z_c}{\partial t^2} + \frac{\delta}{\rho} \frac{\partial z_c}{\partial t} + h \cos \theta_G \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} - h \sin \theta_G \left(\frac{\partial \theta}{\partial t} \right)^2 &= \frac{1}{\rho} \left(T \frac{\partial^2 z_c}{\partial s^2} + P_z \right); \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} (I_c + \rho h^2) \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} + \rho h \left[\cos \theta_G \frac{\partial^2 z_c}{\partial t^2} - \sin \theta_G \frac{\partial^2 y_c}{\partial t^2} \right] + f_c \frac{\partial \theta}{\partial t} &= \\ = GJ \frac{\partial^2 \theta}{\partial s^2} + M_a + M_p, \end{aligned}$$

где y_c, z_c — проекции радиуса-вектора положения оси жесткости провода; T, θ, ρ — модуль тяжения, угол кручения и масса одного метра провода соответственно; δ — коэффициент демпфирования колебаний; $h[h_y, h_z]$ — эксцентриситет провода; $\theta_G = \theta_0 + \theta$ (θ_0 — начальный угол оледенения провода); P_y, P_z — проекции суммарной силы на единицу длины провода; I_c — момент инерции кручения провода, покрытого гололедом; f_c — коэффициент трения кручения провода; GJ — его крутильная жесткость; M_a — аэродинамический момент на единицу длины провода; M_p — момент, создаваемый эксцентричной силой тяжести единицы длины провода.

При пляске проводов изменения аэродинамических сил и моментов, действующих на провода с односторонним гололедом, обусловлены изменением угла атаки, который определяется по выражению:

$$\theta_a = \theta_0 + \theta + \arctg \frac{V_{\bar{r}}}{V}, \quad (2)$$

где V — скорость ветра; $\bar{V}_r = \bar{V} - \frac{d\bar{R}_c}{dt} [V_y, V_z]$ — вектор результирующей скорости провода.

Аэродинамические силы и момент определяются в функции [2]:

$$\begin{aligned} F_y &= 0,5\rho_a V_r D (V_y C_D + V_z C_L) \\ F_z &= 0,5\rho_a V_r D (V_z C_D + V_y C_L), \\ M_a &= 0,5\rho_a C_M V_r^2 D^2 \end{aligned} \quad (2)$$

где C_D, C_L, C_M — аэродинамические коэффициенты лобового сопротивления, подъемной силы и аэродинамического момента [3]; D — диаметр провода; ρ_a — плотность воздуха.

Полученная система уравнений (1) используется для расчета динамики /-го провода на участке между гасителями расщепленной фазы (РФ). Элементы проводов, зафиксированные в их зажимах, двигаются совместно с гасителями. Возможны два подхода к математическому описанию динамики гасителей. В первом случае на основе принципа связей рассматривается их динамика под действием приложенных от проводов сил и моментов. Второй подход к описанию динамики элементов проводов с гасителями заключается в использовании принципов моделирования РФ на основе эквивалентного провода с использованием уравнений (1), в которых GJ и I представляют собой крутильную жесткость и момент инерции эквивалентного провода.

Формулы для их расчета приведены в [2, 4]. На основе принципов связей и суперпозиции составляются уравнения движения центра масс гасителя и вращения вокруг него, а также вращения маятника вокруг оси упруговязкого шарнира под воздействием приложенных от проводов сил и моментов:

$$M \frac{d^2 z_c}{dt^2} - M_p l_p \left[\sin \theta_p \left(\frac{d\theta_p}{dt} \right)^2 - \cos \theta_p \frac{d^2 \theta_p}{dt^2} \right] - \\ - M_p l_b \left[\sin \theta_b \left(\frac{d\theta_b}{dt} \right)^2 - \cos \theta_b \frac{d^2 \theta_b}{dt^2} \right] = \sum_{j=1}^n \Delta T_{\theta_j};$$

$$I'_s \frac{d^2 \theta_b}{dt^2} + M_p l_p l_b \left[\cos(\theta_p - \theta_b) \frac{d^2 \theta_b}{dt^2} - \sin(\theta_p - \theta_b) \left(\frac{d\theta_b}{dt} \right)^2 \right] + \\ + M_p l_b \left(\frac{d^2 z_c}{dt^2} \cos \theta_b - \frac{d^2 y_c}{dt^2} \sin \theta_b \right) = \\ = f \frac{d(\theta_p - \theta_b)}{dt} + c(\theta_p - \theta_b) + \sum_{j=1}^n (M_{\theta_j} + M_{\Delta T_j}) - P_p l_b \sin \theta_b;$$

$$I'_p \frac{d^2 \theta_p}{dt^2} + M_p l_p l_b \left[\cos(\theta_p - \theta_b) \frac{d^2 \theta_b}{dt^2} + \sin(\theta_p - \theta_b) \left(\frac{d\theta_b}{dt} \right)^2 \right] + \\ + M_p l_p \left(\frac{d^2 z_c}{dt^2} \cos \theta_p - \frac{d^2 y_c}{dt^2} \sin \theta_p \right) = \\ = -f \frac{d(\theta_p - \theta_b)}{dt} - c(\theta_p - \theta_b) - P_p l_p \sin \theta_p,$$

где $M = M_s + M_p$; $I'_s = I_s + M_p l_b^2$; $I'_p = I_p + M_p l_p^2$.

Вычислительный эксперимент проводился с помощью компьютерной программы (КП), которая используется для расчета амплитуд и максимальных тяжений при пляске расщепленных проводов. Расчеты проводились с учетом дистанционных распорок и гасителей колебаний для проводов с асимметричным гололедным осадком. Результаты расчета по разработанной КП сравнивались с данными [5] (рис. 1).

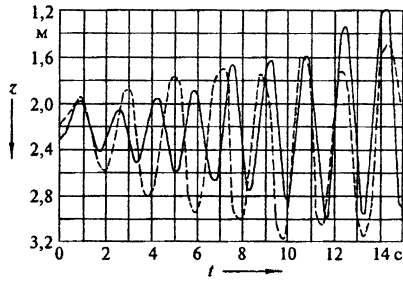


Рис. 1. $l=144$ м; $T_0=30$ кН; провод $2 \times \text{ACSR-240}$; $h=15$ мм

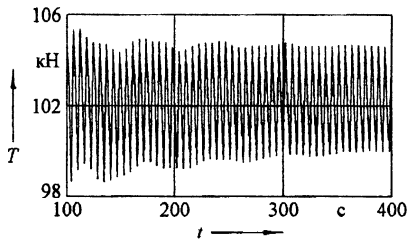


Рис. 2.

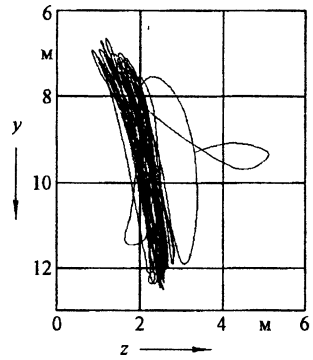


Рис. 3.

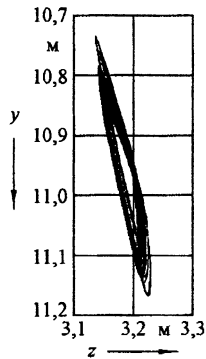


Рис. 4.

В качестве примера также проведен расчет пляски расщепленного провода 3-АС-240/56 ЛЭП 500 кВ $l = 480$ м, $T_0 = 97,5$ кН, $V = 10$ м/с и $\theta_0 = -140^\circ$ (гололед располагался с наветренной стороны проводов). Рассматривалось поведение фазы при наличии 3-х гасителей типа TDD [1], установленных в пролете на равных расстояниях друг от друга. Результаты расчетов, проведенных при различных параметрах гасителей, приведены на рис. 2–7. Как видно (см. рис. 3, 5 и 7), при определенном соотношении параметров гасителя можно ограничить максимальное тяжение, амплитуду колебаний и углы закручивания проводов до очень небольших значений.

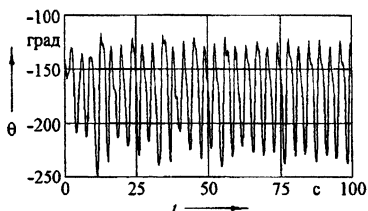


Рис. 6.

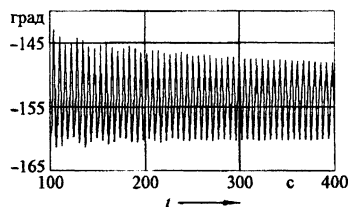


Рис. 7.

Таким образом, разработанный численный метод расчета динамических характеристик пляски расщепленных проводов воздушных ЛЭП с учетом комбинированных гасителей колебаний, подтвержденный сравнением с зарубежными данными, может быть использован при разработке оптимальных схем установок гасителей с различными параметрами, технических требований на линейную арматуру, обеспечивающих ее надежную работу в условиях эксплуатации.

Литература

1. Lilien J. L., Heuntgen R. A new damper to solve galloping on bundled lines. Theoretical background, laboratory and field results. – IEEE Summer meeting, July, 20–24, 1997. Berlin, Germany.
2. Сергей И. И. Математическое моделирование гасителей колебаний расщепленных проводов воздушных ЛЭП // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 1999. – № 6. – С. 21–32.
3. Lilien J. L., Ercicum M., Wolfs M. Overhead Line Galloping, field Experience during one event in Belgium on Last February 13th, 1997. IWAIS '98. International Conference, Reykjavik, Iceland, June 1998, proceedings. – P. 293–299.
4. Wang I., Lilien J. L. Overhead electrical transmission line galloping. A full multi-Span – 3-DOF-Model, some Application and design recommendations // IEEE Transaction on Power Delivery. – Vol. 13, № 3. – 1998. – P. 909–916.

5. Yamaoka A. Numerical Calculation Method for Galloping Oscillation of a bundle conductor Transmission Line // Trans. IEE Japan. – 1979. – В99. – № 9. – P. 569–576.

УДК 621.315

ОБ АНАЛИТИЧЕСКОМ РЕШЕНИИ СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЙ УСТАНОВИВШЕГОСЯ РЕЖИМА РАДИАЛЬНОЙ СЕТИ

Томкевич А. П., Янушкевич О. А.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь (apt@odu.energo.net.by)*

Одним из приоритетных направлений в исследовании задач нелинейных электрических цепей является расчет установившегося режима, требующий решения соответствующей системы нелинейных алгебраических уравнений. К сожалению, в настоящее время в большинстве случаев используются лишь итерационные методы нахождения неизвестных параметров установившегося режима. Обычно такие методы предполагают большой объем вычислительных работ и не всегда являются сходящимися. В связи с этим стала актуальной проблема разрешимости задачи нахождения параметров установившегося режима, что напрямую связано с получением аналитического решения. Ранее [1, 2] предпринимались попытки найти аналитическое решение задачи путем сведения системы нелинейных алгебраических уравнений к параметрическому уравнению. Однако адекватность решения такого уравнения реальному режиму сети определяется выбором значений неизвестных параметров, что в большинстве случаев требует ряда вычислительных экспериментов. Позже [3] для системы уравнений установившегося режима одной линии электропередачи (ЛЭП) получено не только аналитическое решение, но и критерий его существования, что невозможно было сделать методами [1, 2]. Настоящая работа продолжает исследования [3] для случая радиальной сети, состоящей из двух последовательных ЛЭП.

В качестве физической модели линий для расчета режима используем П-образную схему замещения ЛЭП. Это позволяет распространить полученные результаты на линии различного исполнения (кабельные или воздушные) и всевозможных номинальных напряжений.

ЛЭП опишем при помощи направленного взвешенного графа, состоящего из трех узлов и двух ребер (рис. 1). Каждый узел характеризуется двумя параметрами мощностью \underline{S}_i и напряжением \underline{U}_i ($i = \overline{1,3}$). Ребро взвешено четырехмерными векторами $r_{ik}; x_{ik}; g_{ik}; b_{ik}$, $i = \overline{1,3}$, $k = \overline{1,3}$. Компоненты которых будем считать известными величинами, не зависящими от параметров режима \underline{S}_i и \underline{U}_i . Направление графа отражает положительное направление перетока мощности по ЛЭП (на рисунке от узла 1 к узлам 2 и 3).

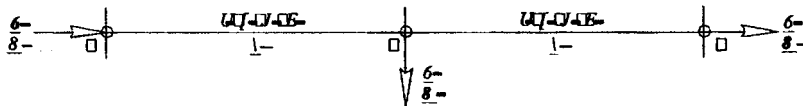


Рис. 1.

Для получения аналитического решения в качестве математической модели используем систему уравнений, полученную с помощью одного из электротехнических методов [4]. В зависимости от способа представления узлов сети система уравнений получается линейной или нелинейной. В случае известных параметров \underline{S}_i и \underline{U}_i одного из узлов рассматриваемой сети получается линейная система уравнений, решение которой приведено в [4]. В других случаях – система уравнений нелинейная и традиционно решается итерационными методами (Ньютона-Рафсона, Зейделя и др.), сходимость которых зависит от выбранного начального приближения и формы записи уравнений.

По аналогии с [3] рассмотрим математическую модель сети, полученную с помощью метода узловых напряжений. Отметим, что форма записи уравнений существенной роли не играет и зависит от известных и неизвестных параметров режима. В соответствии с основными положениями этого метода можно записать систему, в которой каждое уравнение соответствует узлу сети. В матричном виде система уравнений узловых напряжений в форме баланса мощности имеет вид

$$diag \underline{U} \cdot \overline{Y} \cdot \underline{U} = \underline{S}, \quad (1)$$

где $diag \underline{U}$ — диагональная матрица напряжений в узлах; \overline{Y} — матрица сопряженных собственных и взаимных проводимостей узлов, зависящая от векторов веса ребра $r_{ik}; x_{ik}; g_{ik}; b_{ik}$; \underline{U} — вектор сопряженных напряжений в узлах; \underline{S} — вектор мощностей в узлах.

Для рассматриваемой сети система (1) имеет вид

$$\begin{cases} \overline{y}_{11} \underline{U}_1 \underline{U}_1 + \overline{y}_{12} \underline{U}_1 \underline{U}_2 = \underline{S}_1; \\ \overline{y}_{21} \underline{U}_2 \underline{U}_1 + \overline{y}_{22} \underline{U}_2 \underline{U}_2 + \overline{y}_{23} \underline{U}_2 \underline{U}_3 = \underline{S}_2; \\ \overline{y}_{32} \underline{U}_3 \underline{U}_2 + \overline{y}_{33} \underline{U}_3 \underline{U}_3 = \underline{S}_3. \end{cases} \quad (2)$$

Узел 1 является балансирующим по мощности, т. е. известен комплекс напряжения \underline{U}_1 и неизвестна мощность \underline{S}_1 . В узлах 2 и 3 считаем напряжения $\underline{U}_2, \underline{U}_3$ неизвестным, а нагрузки $\underline{S}_2, \underline{S}_3$ заданными постоянными мощностями.

Введем следующие обозначения

$$\underline{S}_i = P_i + jQ_i = S_i e^{j\varphi_i}, \quad \underline{U}_i = U_i e^{j\psi_i}, \quad y_{ik} = y_{ik} e^{j\alpha_{ik}}, \quad i = \overline{1,3}, \quad k = \overline{1,3}.$$

Опишем аналитический способ нахождения неизвестных параметров установившегося режима.

В начале методами [3] из последних двух уравнений системы (2) выведем

$$\begin{cases} a_1 U_2^4 + b_1 U_3^4 + c_1 U_2^2 U_3^2 + d_1 U_2^2 + e_1 U_3^2 + f_1 = 0; \\ b_2 U_3^4 + c_2 U_2^2 U_3^2 + e_2 U_3^2 + f_2 = 0. \end{cases} \quad (3)$$

Здесь коэффициенты $a_i, b_i, c_i, d_i, e_i, f_i$ ($i = \overline{1,2}$) являются действительными числами, зависящими от модулей и аргументов известных параметров системы (2).

Далее после несложных преобразований из (3) получаем уравнение

$$U_3^8 + AU_3^6 + BU_3^4 + CU_3^2 + D = 0$$

где $A, B, C, D \in R$.

Подстановкой $t = U_3^2 - A/4$ последнее уравнение приводится к виду

$$t^4 + Ht^2 + Mt + N = 0,$$

которое равносильно двум квадратным уравнениям

$$2t^2 - 2vt + (H + v^2 + M/v) = 0, \quad (4)$$

$$2t^2 + 2vt + (H + v^2 - M/v) = 0. \quad (5)$$

Коэффициент v находится по формулам Кардано из кубического уравнения, составленного по методу Феррари [5].

Таким образом, нахождение модулей неизвестных напряжений свелось к решению нескольких уравнений второго или третьего порядка от одной действительной переменной. Строго говоря, U_2 легко вычисляем из второго уравнения системы (3) после нахождения U_3 на основании уравнений (4) и (5).

Теперь исключим при помощи второго уравнения из третьего уравнения системы (2) произведение $\underline{U}_3 \overline{\underline{U}}_2$

$$\overline{y}_{32} (\overline{S}_2 - \overline{y}_{21} \underline{U}_1 \overline{\underline{U}}_2 - \overline{y}_{22} \underline{U}_2 \overline{\underline{U}}_2) + \overline{y}_{33} \overline{y}_{23} \underline{U}_3 \overline{\underline{U}}_3 = \overline{S}_3 \overline{y}_{23}.$$

Расписав мнимую и действительную часть нового уравнения, находим неизвестный аргумент ψ_2 . Аналогично находится аргумент ψ_3 из второго уравнения системы (2).

И наконец, комплекс мощности \underline{S}_1 очевидным образом вычисляется из первого уравнения системы (2).

Если положить $\underline{S}_2 = 0$, то полученные точные решения системы (2) позволяют определять напряжение в любой точке ЛЭП при заданном установившемся режиме.

В заключении отметим, что указанный аналитический способ нахождения неизвестных параметров позволяет получить необходимые и достаточные условия существования установившегося режима рассматриваемой сети, а также указать число теоретически возможных установившихся режимов.

Литература

1. Прокуроров Н. С. Общий метод решения системы нелинейных уравнений установившегося режима электроэнергетической системы. *Электромеханика*. №9. 1988. С. 13 – 16.

2. Прокуроров Н. С. Аналитическое решение уравнений установившегося режима электроэнергетической системы. *Электромеханика*. №8. 1995. С. 57 – 60.

3. Томкевич А. П., Янушкевич О. А. О точном решении системы уравнений узловых напряжений в форме баланса мощности. *Вестник БГПА*. №1. 2002. С. 63 – 65.

4. Идельчик В.И. Расчеты и оптимизация режимов электрических сетей и систем. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 288 с.

5. Курош А. Г. Курс высшей алгебры – М.: Наука, 1968. – 431 с.

УДК 697.34

ПРИМЕНЕНИЕ ЧАСТОТНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НА РАЙОННОЙ СТАНЦИИ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

Седнин В.А., Седнин А.В., Кухта А.Н.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

В связи с массовым внедрением средств регулирования тепловой нагрузки у потребителей теплоты в системах централизованного теплоснабжения актуальным является вопрос о влиянии их работы на режимы теплоисточника. Это касается как состояния полного охвата потребителей средствами регулирования, так и состояния, когда регуляторы установлены только у части потребителей. Автоматизация режимов потребления требует пересмотра и структуры, и схем энергогенерирующего оборудования, что в свою очередь требует проведения

экспериментальных исследований для уточнения и отработки режимов взаимодействия элементов систем централизованного теплоснабжения /1,2/.

В августе-сентябре 2001 г. на котельной по ул. Староборисовский тракт 48 УП «Минсккоммунтеплосеть» ОНИЛ ЭТР БГПА была внедрена автоматизированная станция управления сетевой группой летней части котельной. В состав летней сетевой группы котельной входят: котел ДКВР10/13 (ст. №1) переведенный на водогрейный режим, номинальной мощностью 10 Гкал/ч, котел ДКВР10/13 (ст. №2) переведенный в комбинированный паро-водяной режим, с максимальной мощностью на водогрейном режиме 5 Гкал/ч и паровой котел ДКВР 10/13 (ст. №3), работающий на собственные нужды котельной. Максимальная мощность двух котлов на водогрейном режиме составляет 15 Гкал/ч.

Для организации автоматического управления оборудования летней сетевой группы котельной была проведена ее модернизация в ходе которой были произведены следующие изменения: заменены сетевые насосы Д315-71 на одном из которых был установлен частотный привод фирмы Danfoss типа VLT6000, установлен насос рециркуляции –Ipn-150/300-22/4 фирмы Wilo, с частотным приводом той же фирмы, заменены насосы подпитки и регулирующие клапана на линиях перепуска, рециркуляции (существующей), подпитки тепловой сети, уровня воды в деаэраторе. Тепловая схема котельной и присоединенных к ней потребителей приведены на рис. 1. Там же приведены и основные характеристики установленного оборудования.

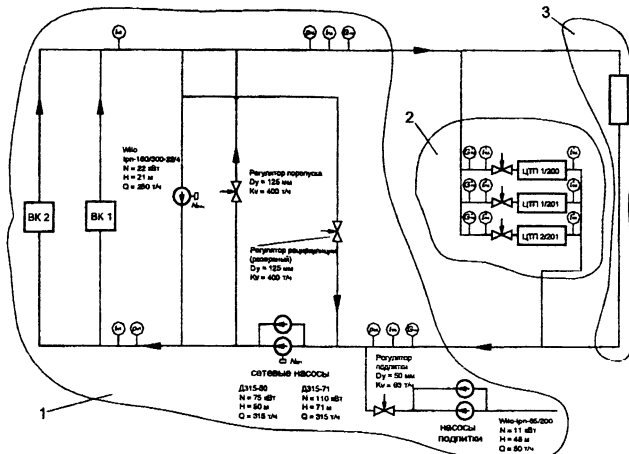


Рис. 1 Принципиальная тепловая схема котельной и присоединенных потребителей: 1 — оборудование находящееся в котельной, 2 — полностью автоматизированный потребитель, 3 — неавтоматизированный потребитель.

Проанализируем характерные моменты работы теплоисточника и тепломагистралей. Схему тепловых сетей от РК, можно представить в виде двух параллельных магистралей, подключенных к одной сетевой группе теплоисточника.

Очевидно [3], что в случае поддержания постоянным перепада давления на выходе из котельной расход теплоносителя в сети и его распределение по магистральям определяются гидравлическими сопротивлениями последних. Установка средств регулирования у теплопотребителей делает величины гидравлическими сопротивления переменными. При этом гидравлическое сопротивление сети является функцией тепловой нагрузки потребителей. Следует отметить, что мы не касаемся вопроса несоответствия скоростей изменения полей температуры и давления в тепловой сети. Таким образом, расход теплоносителя в тепловой сети и в отдельных ее магистральях определяется вектором состояния регулирующих клапанов потребителей, которые в свою очередь зависят от потребности теплоты в данный момент времени.

Рассмотрим вариант, когда в одной ветви тепловой сети, например в первой, все потребители оснащены устройствами регулирования, а во второй регуляторы отсутствуют у всех потребителей, что практически соответствует условиям эксплуатации котельной. В этом случае при постоянном перепаде давления на коллекторах теплоисточника во второй ветви расход теплоносителя будет постоянным независимо от изменений гидравлического сопротивления первой магистрали. Увеличение расхода теплоносителя во второй магистрали может происходить только за счет колебаний перепада давления на коллекторах теплоисточника в результате изменения гидравлического сопротивления первой магистрали.

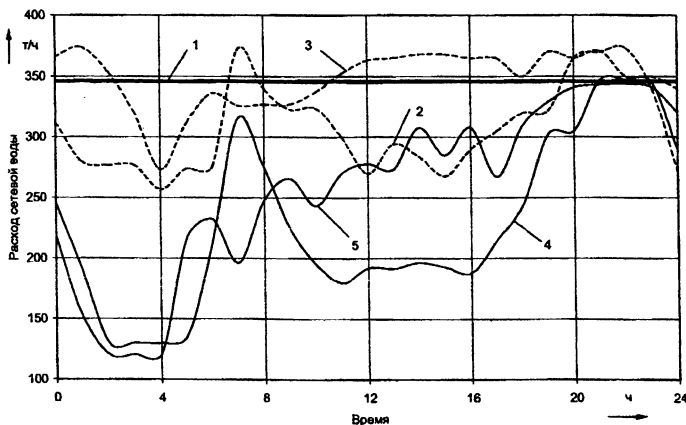


Рис. 2 Зависимости расхода сетевой воды на котельной от времени суток

На рис. 2 приведены зависимости расхода сетевой воды на котельной от времени суток, которые подтверждают выше приведенные рассуждения. Линия 1 представляет собой расход сетевой воды от котельной при отключенном регулировании расхода сетевой в течение суток, кривые 2 и 3 — расход сетевой воды при регулируемом теплоснабжении на одной из магистралей и отсутствии частного привода на сетевом насосе котельной для буднего и выходного дня соответственно; кривые 4 и 5 — расходы сетевой воды при регулируемом теплоснабжении на одной из магистралей и с установкой частотного привода на сетевом насосе котельной.

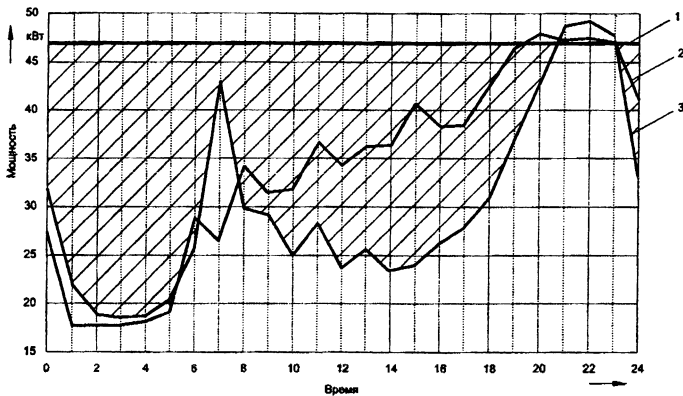


Рис. 3. Зависимости мощности сетевого насоса от времени суток

На рис.3 показана зависимость мощности сетевого насоса от времени суток. Кривая 1 — представляет собой мощность потребляемую сетевым насосом при отключенной системе управления теплоснабжения, кривые 2 и 3 — изменение мощности сетевого насоса при работающей системе регулирования теплоснабжения и работающем частотном приводе. Заштрихованная область представляет собой экономию электроэнергии от установки частотного привода за сутки (для буднего дня). Как видно экономия электроэнергии в данном случае может достигать 30–50 %.

Литература

1. Создание систем управления технологическими процессами теплоснабжения. Концепция и методология: Отчет о НИР (заключительный) / БГПА; рук. темы В.А. Седнин – №ГР 19981127. – Минск, 1998. – 68 с.
2. Исследование режимов работы системы теплоснабжения от котельной «Жодинская» ПП «Минсккоммунтеплосеть» при автоматизации ЦТП:

Отчет о НИР (промежуточный) / БГПА; Рук. темы В.А. Седнин – Договор № 87. – Минск, 2000. – 59 с.

3. Соколов Е.Я. Теплофикация и тепловые сети. – М.: Энергия, 1982. – 2. – 360 с.

УДК 621.1

ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ДЛЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ И ПРОМЫШЛЕННО-ОТОПИТЕЛЬНЫХ КОТЕЛЬНЫХ

Врублевский И.И., Есьман Р.И., Ярмольчик Ю.П.

Белорусский национальный технический университет

Минск, Беларусь

В предшествующие 20–25 лет в условиях технического прогресса крупных тепловых электростанций, развития ядерной энергетики и низкой стоимости топлива мелкие ТЭЦ потеряли свою конкурентоспособность и строительство их было прекращено, хотя попытки обосновать их энергосберегающую эффективность предпринимались в начале 80-х годов. В настоящее время, когда строительство крупных тепловых электростанций сталкивается с серьезными социальными, экологическими и инвестиционными проблемами, когда прежняя идеология развития крупной теплофикации оказывается технически и экономически проблематичной, а стоимость органического топлива приблизилась к мировым ценам, рентабельными во многих случаях становятся и малые ТЭЦ, как показывают непредвзятые и обстоятельные обоснования их эффективности в условиях рыночной экономики. К тому же такие ТЭЦ претерпевают существенное техническое изменение в части повышения экономичности и качества основного оборудования, снижения его материалоемкости, автоматизации управления технологическими процессами, применения блочного монтажа оборудования и др. Их важными достоинствами являются быстрота сооружения, небольшие единовременные капиталовложения и возможность строительства за счет средств отраслевых министерств и ведомств.

Естественно, малые ТЭЦ не противопоставляются строительству средних и крупных электростанций (ТЭЦ, ГРЭС, АЭС), а лишь дополняют их в электроэнергетическом балансе энергосистемы и, прежде всего, они рассматриваются как источники экономии энергоресурсов.

Даже при ведомственной принадлежности быстрый разворот потенциала малой энергетики может заметно пополнить баланс мощности в энергоси-

стеме и облегчить во времени техническое перевооружение (обновление) существующих и строительство новых крупных электростанций.

В ряде случаев небольшие теплофикационные установки могут устанавливаться на действующих и новых промышленных и промышленно-отопительных котельных.

Как показало изучение вопроса о возможной турбинизации производственных и отопительных котельных с промышленными паровыми котлами (рабочее давление пара 1,3–1,4 МПа при температуре насыщения либо перегреве до 250°C), в их подавляющем большинстве применяется дросселирование свежего пара с целью получения пара требуемых параметров. Либо прямо на котлах держат необходимое понижение давления пара. В обоих случаях не используется возможная потенциальная энергия пара, полученная от сжигаемого топлива.

Вместе с тем при установке в таких котельных паровых противодавленческих турбоагрегатов малой мощности пропускаемый через них пар будет сбрасываться от начальных параметров на котлах до давления, нужного потребителю, и в результате бесполезно теряемый до этого потенциал пара будет использоваться для выработки малозатратной электрической энергии. При этом увеличение абсолютного расхода топлива котельной, связанное с производством электроэнергии, составляет в зависимости от мощности турбоустановки 3–7% по отношению к расходу топлива, затрачиваемому на производство тепловой энергии.

Вырабатываемая турбогенератором электроэнергия идет на покрытие собственных нужд котельной и предприятия, а ее избыток может продаваться в энергосистему на выгодных условиях, что предусмотрено правительственным нормативным актом развития и стимулирования малой энергетики.

Развитие малой теплофикации на базе турбинизации котельных началось в Беларуси (впервые в СНГ) в 1994г., когда по инициативе белорусских энергетиков на ОАО «Калужский турбинный завод» (Россия) начали создаваться первые блочные паровые теплофикационные турбогенераторные установки мощностью 600 и 3500 кВт с производственным и отопительным противодавлением для конкретных объектов.

Турбогенераторная блочная установка состоит из смонтированных на общей раме со встроенным маслобаком — турбины, редуктора (не у всех турбоустановок), генератора, пускового масляного электронасоса. Клапан предохранительный, эжектор пароструйный, пульт управления и щит генераторный, поставляемые с установкой, устанавливаются рядом.

Удельная заводская стоимость турбогенераторов типа ТГ в зависимости от мощности составляет 240–500 тыс. руб. за 1кВт (большая для турбоустановок 500–750 кВт).

За счет комбинированного производства тепла и электроэнергии на базе существующих промышленных и отопительных котельных затраты на установку турбогенератора окупаются за 3–5 лет. При этом повышается автономность энергоснабжения котельной, что позволяет ей оставаться в рабочем режиме при отключении от энергосистемы, т.е. сохранить технологический процесс предприятий, связанных с котельной по пару и теплу.

Большинство паровых котлов существующих котельных вырабатывают пар давлением 1,0–1,4 МПа, тогда как потребителям требуется пар давлением 0,12–0,5 МПа. В большинстве случаев перепад давления сбрасывается на РОУ и потенциальная энергия давления безвозвратно теряется. Турбоагрегаты могут быть включены в тепловую схему котельной и тем самым удастся получить независимый энергоисточник, превратив котельную в мини-ТЭЦ.

УДК 621.1

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ ВКЛЮЧЕНИЯ ПТГ В ТЕПЛОВУЮ СХЕМУ МАЛЫХ И СРЕДНИХ КОТЕЛЬНЫХ

Врублевский И.И., Есьман Р.И., Ярмольчик Ю.П.

Белорусский национальный технический университет

Минск, Беларусь

Паротурбогенератор (ПТГ) позволяет использовать энергию пара низких параметров (в том числе насыщенного), сбрасываемую, как правило, в редуционных устройствах котельных.

ПТГ могут быть включены в тепловую схему малых и средних котельных, пар которых используется для теплофикационных и технологических целей. Тем самым удастся получить с минимальными капитальными затратами независимый от энергосистемы источник промышленной и бытовой электроэнергии, превратив котельную в мини-ТЭЦ, при этом ПТГ может работать как в автономном режиме, так и параллельно с энергосистемой или другими источниками электрического тока, а пар, отработавший в турбине, поступает на теплофикационные или технологические нужды.

В подтверждение вышесказанному рассмотрим установку турбоагрегата ПТ 3,5/6,3- Р12/1,2 на районной котельной «Северная» (г. Гродно), являющуюся одним из наиболее крупных источников централизованного теплоснабжения города.

Основное оборудование котельной:

— четыре паровых котла с единичной мощностью по 50 т/ч;

— шесть водогрейных котлов с единичной мощностью по 50 Гкал/ч.

Характеристика устанавливаемой турбины:

— мощность электрическая номинальная при $\text{Cos}\phi=0,8$ МВт 3,5 Номинальные параметры сухого насыщенного пара перед турбиной:

— давление абс., МПа (кгс/см²) 1,18 (12)

— температура $t_s=230^\circ\text{C}$

— степень сухости не менее 0,999

— расход пара на номинальной мощности т/ч (не более) 48,0

Давление пара за турбиной (противодавление) абс., МПа (кгс/см²):

— номинальное 0,118 (1,2)

— максимальное 0,4 (4,0)

— минимальное 0,06 (0,6)

Габаритные размеры ПТГ смонтированного на общей раме, м:

длина — 6,827; ширина — 2,700; высота — 3,353.

Зависимость электрической мощности от производительности и величины противодавления представлена на Рис. 1.

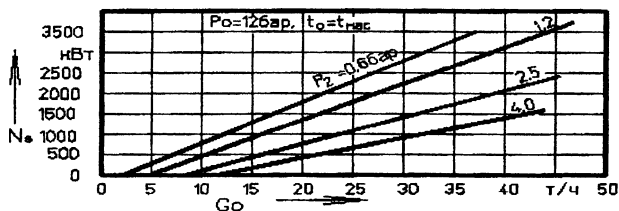


Рис. 1. Энергетическая характеристика турбогенераторной установки ТГ 3,5/10,5-Р12/1, ОАО КТЗ

P_0, t_0 — давление и температура пара перед турбиной;

G_0 — расход пара на турбину;

P_2 — давление пара за турбиной;

$N_э$ — электрическая мощность.

Принципиальная тепловая схема котельной после реконструкции приобретает вид согласно рис.2.

Для оценки эффективности использования инвестиционных ресурсов рассчитываются показатели функционирования рассматриваемого объекта без намечаемой реконструкции и с учетом ее проведения. Эффективность определяется по изменению показателей

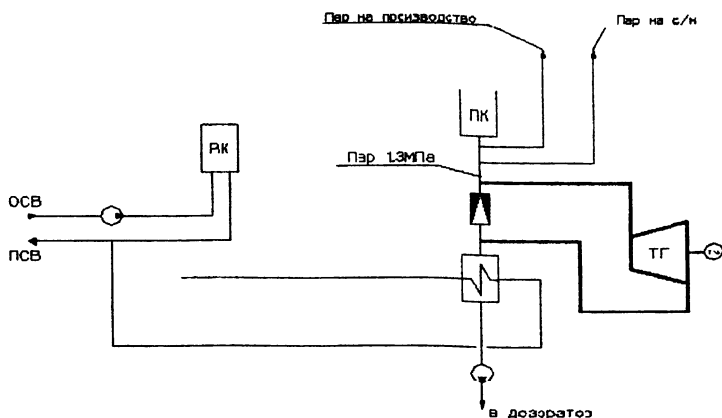


Рис. 2. Принципиальная тепловая схема котельной.

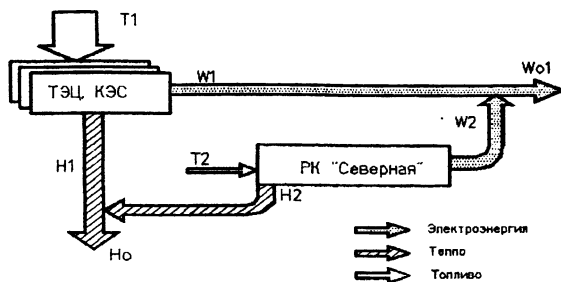


Рис. 3.

Укрупненный баланс выработки электрической и тепловой энергии по ПОЭиЭ «Гродноэнерго» до реконструкции районной котельной «Северная» в г. Гродно с установкой турбин и после. (W_1 — выработка электроэнергии генерирующими мощностями; W_2 — потребление электроэнергии РК на обеспечение собственных нужд; W_0 и $W_{0.1}$ — отпуск электроэнергии потребителям до и после реконструкции; T_1 и T_2 — расходы топлива до и после реконструкции; H_0 , H_1 и H_2 — отпуск тепла потребителям от объектов энергосистемы и РК до и после реконструкции).

Рассматриваемый энергоисточник является структурной единицей энергосистемы «Гродноэнерго» и результаты его реконструкции повлияют на работу всей системы. Для определения эффекта от установки турбины на котельной составлена упрощенная схема энергоданса системы, приведенная на рис.3, с технико-экономическими показателями, приведенными в таблице 1.

Таблица 1.

Показатель *	Без проекта	По проекту
Установленная мощность		
Электрическая, Мвт	-	3,5
Тепловая, Гкал/ч	412,0	415,0
Годовой отпуск производимой продукции,		
Электроэнергия, млн. кВт•час	-	25,2
Млрд. руб.	-	259,13
Тепловая энергия, тыс. Гкал	409,1	409,1
Млрд. руб.	1559,59	1559,59
Всего отпуск производимой продукции, млрд.руб/год	1559,59	1818,72
Удельный расход условного топлива		
Отпуск электроэнергии, г/кВт•час	-	165,3
Отпуск тепла, кг/Гкал	166,4	167,2
Себестоимость отпускаемой продукции, млрд. руб./год	1608,71	1699,56
Себестоимость отпускаемой продукции		
Электроэнергия, руб./кВт•час	-	3966,8
в т.ч. топливная составляющая руб./кВт• час	-	2982,0
Тепловая энергия, тыс. руб./Гкал,	3932,3	4012,4
в т.ч. топливная составляющая, тыс.руб./Гкал	3001,7	3016,1
Балансовая прибыль, млрд. руб./год		130,84
Чистая прибыль, млрд. руб./год		95,9
Срок окупаемости капиталовложений (по чистой прибыли), лет		3,3
Срок возврата капитала, лет		4,8
* — стоимость приведена на 01.04.2003		

Не только вышеприведенный, но и многие другие примеры (включая реализованные проекты) показывают, что в новых экономических условиях энергосбережение на базе небольших теплофикационных установок оказывается вполне конкурентоспособным и рентабельным. Для этого суммарные удельные капитальные вложения в них должны быть в пределах 500–700 тыс. руб./кВт, удельный расход топлива на выработку электроэнергии — на уровне 170 г.у.т./кВт·ч, а число часов использования установленной электрической, соответственно и — тепловой, мощности должно составлять 7000–8000.

В этой области РУП «БЕЛНИПИЭнергопром» совместно с учеными из БНТУ выполнены и ведутся исследования и технические проработки по ряду промышленных и районных отопительных котельных, которые уже получают практическую реализацию.

УДК 621.1

РАЗРАБОТКА ВЫСОКОЭФФЕКТИВНОГО КОМПЛЕКСНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ОБРАБОТКИ АКТИВНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПРОМЫШЛЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Есьман Р.И., Ярмольчик Ю.П., Ярмольчик М.А.

Белорусский национальный технический университет

Минск, Беларусь

Несмотря на достаточно известные и хорошо зарекомендовавшие себя технологии по очистке активных поверхностей от различных как органических, так и неорганических загрязнений, существует достаточно серьезная проблема, связанная как с качеством, так и со временем их очистки.

Известно, что повышение качества обработки активных поверхностей промышленных конструкций и машин с , например, SA 1,0 до SA 2,5, приводит к увеличению сроков их эксплуатации до 2 раз, что ведет к значительному снижению материальных затрат. Кроме того, представляется очевидным, что даже незначительное, на первый взгляд, уменьшение слоя отложений на теплообменных поверхностях приводит к значительному экономическому эффекту. Так, слой отложений во внутренних полостях труб конденсатора паровой турбины в 1..1,5 мм, повышает температурный напор на 3..3,5 °С, что приводит к дополнительному сжиганию ~5 т мазута в 1 час. Кроме того, работы по очистке поверхностей трудоемки и требуют значительных затрат времени, что приводит к увеличению времени простоя теплоэнергетического оборудования.

В мировой экономике на современном этапе на каждого жителя приходится ~ 50 м² активных поверхностей промышленных, строительных и прочих конструкций, подлежащих поверхностной обработке под различные виды коррозионно-устойчивых и других покрытий. Качество этих покрытий и срок их эффективного действия в значительной степени зависит от качества обработки поверхностей и их подготовки к покрытию. Увеличение срока службы защищающих покрытий активных поверхностей только на 10% (что возможно, например, при улучшении среднего качества обработки поверхностей с ныне приемлемого в нашей республике SA 1..1,5 по шведскому стандарту (ISO 8501-1:1998) до SA 2..2,5), позволит уменьшить затраты на металл в пределах нашей республики не менее, чем на 10000 т/год, затраты на дорогостоящие покрытия не менее 1 000 000 м²/год. Эта задача также в значительной степени актуальна и в теплоэнергетике, где применяются различные технологии очистки внутренних поверхностей труб и межтрубного пространства от накипи, отложений солей, иных неорганических и органических наслоений. При этом каждая из известных технологий наиболее эффективна для конкретного вида отложений. Из технологий динамической очистки наиболее распространены в мировой практике пескоструйные, гидравлические и газо-термические аппараты. Современные тенденции последних разработок и патентов (в т. ч. в развитых странах), главным образом, заключаются во все большем увеличении кинетических энергий очищающих потоков, при этом затраты на их образование, как правило, увеличиваются.

Авторами разработаны принципиальные схемы установки, реализующей технологию очистки загрязненных поверхностей, в зависимости от физико-химических свойств поверхностей и загрязнений.

Схема аппарата, реализующего разработанную технологию, выглядит следующим образом: Топливо — керосин, бензин, горючий газ, а после разогрева и более тяжелое, например, дизельное топливо вытеснением независимо подается в горелку, где порционно смешивается со сжатым до, как минимум такого же давления, воздухом, причем горелка устроена так (за счет завихрителей потоков, противонаправления и распыления струй топлива и окислителя), что происходит тщательное их смешивание с подогревом в рабочем состоянии до камеры сгорания. Зажигание горючей смеси может происходить как за пределами камеры сгорания (у среза сопла) внешним источником при пониженной подаче окислителя с последующим затягиванием пламени в камеру сгорания путем увеличения расхода окислителя, так и непосредственно в камере сгорания (например, свечой зажигания). Дисперсный материал (кварцевый песок, шлаки цветной металлургии, металлическая дробь и т. д.) подается в горелку из специального питателя сжатым возду-

хом так, что смешение дисперсионного потока с потоком продуктов сгорания (для некоторых случаев — не догоревшими) происходит в специальной камере, так, чтобы динамическое сопротивление дисперсионного потока было минимальным. Устройство заканчивается соплом, где окончательно (за исключением специальных случаев, где необходим догар за пределами сопла горелки) смешиваются оба потока.

Показатели устройства, реализующего разработанную технологию:

- давление воздуха ~ 0,6 МПа;
- давление подачи топлива ~ 0,4 МПа;
- дисперсность 0,1..3 мм;
- производительность ~ не менее 1 кв. м. / мин;
- расход сжатого воздуха ~ 6 куб. м. / мин;
- расход топлива ~ 0,2 кг/мин;
- расход дисперсного материала ~ 2 кг/мин.

Габариты и масса устройства:

- длина ручной горелки ~ 0,5 м;
- диаметр ручной горелки ~ 0,05..0,1 м;
- масса ручной горелки ~ 3..5 кг;
- масса всего устройства с ресивером, питателем дисперсного материала, шлангами, топливным баком и т. д. (без компрессора) ~ 150 кг.

Исходя из параметров поверхностных загрязнений металлов и их сплавов, были разработаны принципиальные схемы установки для очистки отложений различного происхождения и физико-химических свойств. Были рассмотрены три основные группы загрязненных поверхностей с точки зрения характера и энергии очистных потоков и требований к состоянию рабочих поверхностей после очистных мероприятий.

1. Неглубокие, мягкие загрязнения, как правило, связанные с биологическими и чисто механическими наслоениями. Подобные наслоения, как правило, образуются на поверхностях цветных металлов, мягких нержавеющей сталей, каменных и бетонных поверхностях и т. д. Помимо требований к качеству обрабатываемых поверхностей, существенным здесь представляется невозможность (крайняя нежелательность) изменения состояния поверхности, связанная с механической мягкостью подобных материалов и, следовательно, относительной легкостью механического повреждения (царапины, выбоины и т.д.). Вышеприведенные аргументы доказывают нежелательность применения для очистки подобных поверхностей дисперсного материала с твердостью, превышающей твердость самих поверхностей, что неизбежно приведет к внешним повреждениям этих поверхностей. Кроме того, цветные металлы имеют низкую температуру плавления, что ограничивает использо-

вание высокотемпературных установок. Таким образом, вышеописанные поверхности нежелательно очищать ни термическими, ни термо-дисперсионными способами. Для подобных поверхностей были предложены следующие способы очистки: газовый (холодный), жидкостный и, наиболее эффективный, газо-жидкостно-дисперсионный. Это обусловлено уникальностью, с точки зрения решения поставленной задачи, рабочих частиц. В отличие от жидкостного, а тем более, — газового потока, частица газо-жидкостно-дисперсионного потока имеет значительную кинетическую энергию (плотность в несколько раз выше) и дискретностью (после соприкосновения с очищаемой поверхностью частица не дробится), что значительно повышает не только скорость, но и качество обработки поверхностей. С другой стороны, частица газо-жидкостно-дисперсионного потока обладает вязкостью поверхностного жидкого слоя, что позволяет производить более бережную, чем газотермический, газодисперсионный и термо-газо-дисперсионный потоки, очистку. Подобную схему рекомендуется применять для обработки ценных пород древесины, очистки исторических памятников (бронза, мрамор, гранит и т.д.), зданий, удаления лакокрасочных загрязнений зданий, санирования бетона и т.д.

2. Некоторые виды загрязнений легко удаляются путем выжигания. К ним, в первую очередь, относятся отложения биологического происхождения, старые покрытия легковыгораемыми материалами (с температурой сгорания менее 1000 °С). В некоторых специальных случаях требуется санитарная очистка тех или иных поверхностей (уничтожение бактерий, микробов, вирусов), при этом некоторые виды вирусов выживают при температурах более 100 °С в течение нескольких минут, но при температурах, близких к 1000 °С для их уничтожения достаточно сотых долей секунды. Для подобных целей как нельзя лучше подходит газо-термическая струя больших энергий и высоких температур. При этом, получается несколько преимуществ перед известными и широко используемыми ныне в промышленности и сельском хозяйстве (санитарная очистка стен и полов птичников, свинарников и т.д.) горелочными устройствами и (или) простой очисткой струей газа (как правило, воздуха) или струей жидкости (водой, моющими средствами, убивающих бактерии химических растворов). К таким преимуществам следует отнести одновременное воздействие высокой температуры, мгновенно выжигающей органические наслоения, и мощной динамической струи газа, уносящей твердые продукты сгорания, что значительно повышает качество очистки. В случае, если поверхность после очистки подлежит покрытию лакокрасочными материалами, следует отметить еще одно преимущество, связанное с образованием обезжиренной термопленки, что исключает необходимость обработ-

ки поверхностей химическими обезжиривающими веществами и создает идеальные условия для нанесения лакокрасочных покрытий. Как показали испытания, такие условия сохраняются как минимум в течении двух часов после газо-термоочистных мероприятий. Установка такого типа наиболее проста, и реально представляет собой аналог прямоточного жидкостного реактивного двигателя. Схема представляется наиболее простой из описанных в настоящей работе, в связи с отсутствием достаточно сложной системы подпитки, подачи и смешения дисперсионного материала. Однако, в случае твердых загрязнений химического происхождения (коррозия, накоп, шлаки и т.д.) газо-термическая схема менее эффективна.

3. Термо-газо-дисперсная схема включает в себя ряд преимуществ газотемической и газо-водяной, а также дополнительные эффекты, способные не только сократить сроки ремонта и подготовки оборудования к работе, благодаря значительному увеличению производительности и простоте эксплуатации установок, работающих по такой технологии, но и качественно улучшить чистоту обрабатываемых поверхностей. Для конденсаторов паровых турбин вышеприведенная схема представляется наиболее эффективной.

Для получения возможно меньших потерь (минимизации динамического сопротивления) энергии потока любые местные сопротивления при движении воздушно-дисперсной струи недопустимы.

Таким образом, были выбраны оптимальные варианты подвода потоков, позволяющие организовать наиболее оптимальное смесеобразование с наименьшими потерями на гидравлическое сопротивление:

— (смесь воздух + дисперсный материал) — прямой поток без вставок, завихрителей, изгибов и других местных сопротивлений;

— (окислитель — воздух) — тангенциальный подвод в камеру сгорания, обрамляющую трубку для подвода смеси воздух + дисперсный материал;

— (топливо) — тангенциальный подвод в камеру сгорания.

Для безопасности эксплуатации проектируемого устройства, наиболее действенным был принят подвод окислителя прежде топлива.

УДК 621.165

ЦЕЛИ И ВОЗМОЖНОСТИ ЭФФЕКТИВНОГО ПРИМЕНЕНИЯ СУТОЧНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ОТПУСКА ТЕПЛОТЫ ОТ ТЭЦ

Качан А.Д., Качан С.А., Стрелкова О.А.

Белорусский национальный технический университет

Минск, Беларусь

Наиболее полная реализация возможностей суточного регулирования отпуска теплоты от ТЭЦ и котельных требует установки специальных аккумуляторов теплоты (АТ), как паровых, так и на горячей воде [1–2]. В Беларуси АТ в системах теплоснабжения отсутствуют, поэтому суточное регулирование отпуска теплоты может осуществляться только за счет аккумуляирования ее в тепловых сетях.

Целями суточного регулирования отпуска теплоты от теплоисточников могут быть следующие.

1. Повышение экономичности работы ТЭЦ с противоаварийными паровыми турбинами.

Такой эффект может достигаться в том случае, когда характеристики указанных теплофикационных установок отличаются резким снижением их экономичности при малых тепловых нагрузках.

В первую очередь это относится к ПГУ Оршанской ТЭЦ, особенностью которой является не только снижение экономичности при частичных нагрузках, но и техническая невозможность ее использования при снижении тепловой нагрузки ниже определенной предельно-минимальной величины.

Важнейшей характеристикой теплофикационных ПГУ является зависимость экономии топлива против раздельной схемы энергоснабжения ДВ от тепловой нагрузки ГТУ Q_t ,

$$\Delta B = N_{\text{ГТУ}}^{\text{н}} \beta_{\text{зам}} + Q_t \beta_{\text{кот}} - B_{\text{ГТУ}}, \quad (1)$$

где $N_{\text{ГТУ}}^{\text{н}}$, $B_{\text{ГТУ}}$ — мощность «нетто» и расход условного топлива на ГТУ; $b_{\text{зам}}$, $\beta_{\text{кот}}$ — удельный расход условного топлива на отпуск электроэнергии от замещающей КЭС и на отпуск теплоты от замещающей котельной.

Проведенные нами исследования [3] показали, что для ПГУ Оршанской ТЭЦ, работающей в летний период в составе одной ГТУ, при тепловой нагрузке менее 22–23 МВт системная экономия топлива ДВ уменьшается до нуля, а в случае снижения тепловой нагрузки одной ГТУ ниже $Q_t^{\text{min}} \approx 18$ МВт использование ее становится технически невозможным.

По данным анализа характерного суточного графика тепловой нагрузки летнего периода 2001 г., представленного Оршанской ТЭЦ, в вечерне-ноч-

ной провал теплопотребления длительностью $t_{\text{пр}} = 8$ часов тепловая нагрузка составляет $Q_{\text{пр}} = 16,8$ МВт. В остальные часы суток $Q_{\text{шмк}} \approx 32,5$ МВт.

Как видно, в ночные часы суток тепловая нагрузка $Q_{\text{пр}}$ меньше предельно возможной для ПГУ, т. е. использование ее является невозможным.

При выравнивании суточного графика теплопотребления средняя тепловая нагрузка составит около 27,3 МВт.

Расчеты, проведенные с использованием разработанной нами для ПГУ Оршанской ТЭЦ /3/ программы оптимизации режимов, показали, что при работе ПГУ в составе одной ГТУ с тепловой нагрузкой 27,3 МВт при средней температуре наружного воздуха $t_{\text{н}} = 20^{\circ}\text{C}$ экономия топлива в энергосистеме составит $\Delta B = 0,82$ т у.т./ч, что за один месяц летнего периода соответствует экономии топлива в энергосистеме $\Delta B_{\text{мес}} = 590$ т у.т. За весь летний период продолжительностью около 3500 часов экономия топлива превысит 2800 т у.т.

Таким образом, суточное регулирование отпуска теплоты от ПГУ Оршанской ТЭЦ в летний период не только обеспечивает техническую возможность ее использования, но и приводит к существенной экономии топлива в энергосистеме.

Суточное регулирование отпуска теплоты от ПГУ Оршанской ТЭЦ целесообразно также и в другие периоды ее работы с частичной и неравномерной тепловой нагрузкой. При этом максимум эффекта достигается при полном выравнивании суточного графика теплопотребления.

Существенное снижение экономичности при частичных тепловых нагрузках может иметь место также для паровых турбин с противодавлением, в особенности при значительной величине отношений конечного и начального давлений пара p_2/p_0 .

В связи с этим выравнивание суточного графика тепловой нагрузки для таких турбоустановок, в частности для турбин с противодавлением малой мощности, устанавливаемых в настоящее время на промышленно-отопительных котельных и работающих с величиной $p_2/p_0 \geq 0,2$, также может обеспечить существенное увеличение среднесуточной величины теплофикационной выработки электроэнергии.

2. Увеличение отпуска теплоты из отборов (противодавления) турбин ТЭЦ.

Такая возможность появляется, в частности, на малых ТЭЦ Беларуси с турбинами с противодавлением или ухудшенным вакуумом, когда в летний период в часы максимума теплопотребления тепловая нагрузка ТЭЦ превышает максимальную величину ее для установленных турбоустановок, что требует частичного отпуска теплоты через РОУ или от ПВК, а в период ноч-

ного провала теплопотребления турбины работают с неполной тепловой нагрузкой.

В этих условиях выравнивание суточного графика тепловой нагрузки ТЭЦ может обеспечить более полную среднесуточную нагрузку турбин и, как следствие, позволит увеличить суточную величину теплофикационной выработки электроэнергии. Проведенные исследования показали целесообразность таких режимов работы турбин с противодавлением мощностью 3,5 МВт, установленных на Молодечненской котельной № 1 и котельной «Серверная» в г. Витебск.

Наибольший эффект от суточного регулирования отпуска теплоты может иметь место на таких ТЭЦ, на которых без его применения ночная нагрузка горячего водоснабжения в летний период не позволяет обеспечить технический минимум нагрузки котлов при номинальных параметрах пара. По этой причине приходится выводить из работы паровые турбины и постоянно, в течение всего летнего периода, работать в режиме котельной с использованием паровых котлов низкого давления или водогрейных котлов.

Такие условия имеют место, в частности, на Жодинской ТЭЦ.

На этой ТЭЦ в ночной провал теплопотребления тепловая нагрузка составляет около 23 МВт. Если эту теплоту отпускать от турбины ВК-25-1, переведенной в режим ухудшенного вакуума, то расход свежего пара составит около 45 т/ч, что ниже технического минимума установленных на Жодинской ТЭЦ котлов ПК-20 производительностью 120 т/ч.

По этой причине в летний период Жодинская ТЭЦ работает в режиме котельной с использованием паровых котлов ГМ-50-14. В то же время среднесуточная тепловая нагрузка составляет примерно 30 МВт. Проведенные расчеты показали, что при такой тепловой нагрузке турбина могла бы работать с мощностью около 10 МВт при расходе свежего пара на уровне 60 т/ч, который позволяет обеспечить надежную работу котла ПК-20. В результате экономия топлива в энергосистеме за летний период может достигать 4–5 тыс. т у.т.

3. Исключение избыточного состава работающих котлов и снижение вынужденной неэкономичной конденсационной выработки электроэнергии на ТЭЦ.

В суточный провал тепловой нагрузки ТЭЦ могут создаваться сложности с обеспечением технического минимума нагрузки работающих котлов, что, в частности, может привести к увеличению вынужденной неэкономичной конденсационной выработки электроэнергии. В то же время, в пики суточного теплопотребления может потребоваться включение в работу дополнительных котлов.

Очевидно, что в этих условиях суточное выравнивание графика тепловых нагрузок будет способствовать уменьшению количества работающих котлов в период пиков отпуска теплоты и, соответственно, повышению их теплопроизводительности в часы провала тепловой нагрузки.

В результате не только повысится надежность работы котлов, но и будет достигаться экономия топлива в энергосистеме за счет обеспечения теплового графика работы ТЭЦ и снижения затрат топлива на пуски котлов.

В соответствии с результатами проведенного анализа, суточное регулирование отпуска теплоты с горячей водой с этой целью может применяться на различных ТЭЦ Беларуси. В частности, оно целесообразно в летний период на Минской ТЭЦ-3 при работе на ней двух турбин ПТ-60-130/13, на Мозырской ТЭЦ, Бобруйской ТЭЦ-2 и др.

4. Снижение «перетопа» зданий при плюсовых температурах наружного воздуха и уменьшение «горба» температуры обратной сетевой воды, приходящего на ТЭЦ в утренние часы суток.

«Перетоп» зданий после излома температурного графика тепловой сети является существенным недостатком центрального качественного регулирования отпуска теплоты от ТЭЦ. Для его снижения целесообразно уменьшение температуры прямой сетевой воды в ночные часы суток (в период практически полного отключения нагрузки горячего водоснабжения) ниже требуемой для подогрева горячей воды.

Не смотря на ограниченность времени снижения температуры прямой сетевой воды с учетом разной удаленности потребителей горячей воды от ТЭЦ, для отдельных систем теплоснабжения с малой степенью автоматизации отопительных систем такое регулирование отпуска теплоты может быть достаточно эффективным.

Наличие утреннего «горба» температуры обратной сетевой воды t_{oc} на ТЭЦ объясняется влиянием ночного снижения нагрузки горячего водоснабжения и связанным с этим накоплением теплоты в обратных тепломагистралях /4/. Интенсивность «горба» и время наступления утреннего максимума t_{oc} определяется долей нагрузки горячего водоснабжения и уровнем автоматизации ее абонентов, а также водяным объемом тепловой сети и временем транспорта сетевой воды от потребителей к ТЭЦ.

Наличие «горба» t_{oc} отрицательно сказывается на эффективности работы ТЭЦ из-за ухудшения режимов реального распределения подогрева сетевой воды и увеличения давления в нижнем отборе для турбин с двухступенчатым отопительным отбором, а также снижения располагаемой теплофикационной мощности ТЭЦ и уменьшения максимальной тепловой нагрузки турбин в утренние часы в связи с наличием ограничений по допустимой ве-

личине давления пара в верхнем отопительном отборе и снижением возможного подогрева сетевой воды.

Для выравнивания графика температуры обратной сетевой воды нами ранее для Минской ТЭЦ-4 обоснована целесообразность опережающего снижения температуры прямой сетевой воды в вечерние и начальные ночные часы суток. В первую очередь это следует реализовать для тепломагистрали № 61 МТЭЦ-4, регулирование температурного графика отпуска теплоты по которой осуществляется непосредственно на ТЭЦ.

Влияние суточного регулирования отпуска тепла на работу теплосетей и систем теплопотребления

Суточное регулирование отпуска тепловой энергии путем изменения величины нагрева теплоносителя на энергоисточниках в ночное время оказывает определенное влияние на тепловой режим теплосетей и систем теплопотребления.

Для оценки этого влияния на основании [5] нами была разработана методика, реализованная в компьютерной программе, позволяющая с достаточной степенью точности определить динамику изменения расхода теплоносителя и его температуры в обратной магистрали в зависимости от нагрузки горячего водоснабжения, схем присоединения потребительских систем и степени их автоматизации.

Анализ результатов расчетов и фактических данных показал, что при применении суточного регулирования отпуска теплоты среднесуточная температура воды в подающих трубопроводах t_{01} меняется на 1-1,5°C. При этом величина изменения температуры воды в обратной магистрали t_{02} зависит от степени автоматизации систем горячего водоснабжения (ГВС) и работы систем отопления.

Так, при 100% автоматизации систем горячего водоснабжения повышение t_{01} приводит к снижению расхода сетевой воды через подогреватели ГВС и уменьшению температуры греющей воды после них t_{r2} . Например, при увеличении среднесуточной t_{01} с 55 до 70°C величина t_{r2} снизится с 39 до 30°C. В то же время в теплосетях с 50% качественно работающих регуляторов ГВС повышение t_{01} на эту же величину приведет к увеличению t_{r2} с 38 до 44°C.

Объясняется это тем, что при повышении температуры сетевой воды в прямой магистрали и снижении ее расхода на автоматизированные системы ГВС, растет удельная доля расхода воды на неавтоматизированные системы с более высокими t_{r2} .

В отопительный период для снижения амплитуды «горба» обратной сетевой воды на 1°C требуется существенно большее снижение температуры в прямой магистрали. Вызвано это тем, что снижение температуры на входе в

систему отопления приводит к уменьшению средне-лагарифмической разности температур в отопительных приборах, в результате чего снижается интенсивность теплоотдачи от них. С учетом этого фактора, а также ввиду того, что расход сетевой воды через отопительные системы существенно больше, чем через подогреватели ГВС, величина необходимого снижения температуры прямой сетевой воды для снижения обратной на 1°C находится на уровне $1,8\text{--}2^{\circ}\text{C}$.

Таким образом, изменение среднесуточной температуры в прямой магистрали на 1°C приведет к изменению температуры обратной сетевой воды на $0,4\text{--}0,6^{\circ}\text{C}$. Это в свою очередь окажет некоторое влияние на величину тепловых потерь при транспортировке сетевой воды в тепловых сетях.

Расчеты потерь тепла через изоляцию трубопроводов, выполненные для ряда теплоисточников концерна «Белэнерго», показали, что при изменении среднесуточной t_{01} на 1°C и неизменной температуре в обратной магистрали прирост тепловых потерь составляет $1\text{--}1,2\%$ от исходной величины. Для теплосетей с 50% автоматизированных потребителей эта величина возрастает до $2\text{--}3\%$, а для 100% автоматизированных сетей — снижается до $0,5\text{--}1\%$.

Абсолютная величина прироста тепловых потерь при изменении нагрева теплоносителя на 1°C не превышает $0,3$ Гкал/ч и, следовательно, не может оказать заметного влияния на эффективность применения суточного регулирования.

Литература

1. Андрющенко А.И., Аминов Р.З., Хлебалин Ю.М. Теплофикационные установки и их использование. — М.: Выш. шк., 1989. — 256 с.
2. Стриха И.И. Система аккумулирования теплоты для тепловых электростанций // Энергетика (Изв. высш. учебн. заведений) — 1984. — №2. С. — 77–81.
3. Качан А.Д., Качан С.А. Оптимизация режимов работы утилизационных ПГУ с противоаваленческими паровыми турбинами // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объедин. СНГ). — 2000. — № 3–4. — С. 72–76.
4. Гиршфельд В.Я., Князев А.М., Куликов В.Е. Режимы работы и эксплуатации ТЭС. — М.: Энергия, 1980. — 288 с.
5. Зингер Н.М. гидравлические и тепловые режимы теплофикационных систем. — М.: Энергия, 1976. — 336 с.

УДК 621.165

**МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПРЕДЕЛЬНОЙ ВЕЛИЧИНЫ ЗАБРОСА
ОБОРОТОВ РОТОРА ТУРБИНЫ**

**Балабанович В. К., Федерякин А.Н., Пантелей Е.А., Пантелей Н. В.,
Скоробогатый Н.Н., Глазков П.И., Кулак Е.В.**
*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

В практике эксплуатации турбин большое значение имеет определение предельной величины заброса оборотов ротора. Например, при отключении генератора и несработке защит от разгона турбин.

При проектировании турбин приоритетным является обеспечение надежной их работы. Традиционно основу обеспечения надежности турбин обеспечивают их защиты, в частности, защита от разгона ротора турбины. Турбинные заводы решают эту задачу по классической схеме, основу которой составляют автоматический стопорный клапан, регулирующие клапаны и их сервомоторы. Известны случаи зависания клапанов при подаче сигнала на их закрытие. Это всегда приводит к авариям роторов. Причина в отложении солей на внутренних стенках клапанов из-за неудовлетворительного солевого режима работы котлов. Для турбин малой мощности проблема эта обостряется по двум причинам: первая — малые габариты сервомоторов и вторая — крайне неудовлетворительное солесодержание пара котлов малой мощности. Очевидно, установка турбин малой мощности на промышленно-отопительных котельных требует пересмотра идеологии построения их систем защит и, прежде всего, в сторону повышения надежности их работы. В этой связи большое практическое значение имеет надежное расчетное определение предельной величины заброса оборотов ротора турбины.

Ниже приводятся попытка разработки методики расчета предельной величины заброса оборотов ротора турбины с выводом уравнений для такого расчета и результаты ее проверки в промышленных условиях на натурной турбине ТРБ.

В результате исследований установлено, что предельный заброс оборотов ротора турбины составляет удвоенную величину от их расчетного уровня. Очевидно, при удвоенном и более запасе прочности ротора будет гарантироваться надежность турбины даже при самом критическом для него разгоне (отказе защит), существенно упрощая требования к уровню защит. С учетом таких требований и разработаны первые две белорусские турбины марки ТРБ [1].

Методика расчета предельной величины заброса оборотов одноступенчатого ротора турбины

1. Расчетный режим турбины и параметры пара на номинальном режиме известны.

2. При разгоне $u' = u_{\text{ном}} + \Delta u$, где Δu — шаг оборотов.

3. Определяется окружная скорость $u' = \pi d n'$.

4. Удельный объем пара на выходе из турбины, можно принять, $V_2 = V_{2\text{ном}}$.

5. При заданном расходе пара через ступень G могут быть рассчитаны теоретическая и абсолютная скорости выхода пара из рабочей ступени по формулам (1) и (2):

$$W_2 = \frac{GV_2}{\pi d l_2 \sin \beta_2}, \quad (1)$$

$$C_2 = \sqrt{W_2^2 + U'^2 - 2U'W_2 \cos \beta_2}. \quad (2)$$

а также определен угол направления скорости C_2 по формуле (3):

$$\alpha_2 = \arcsin \left(\frac{W_2 \sin \beta_2}{C_2} \right), \quad (3)$$

где G — расход пара на ступень; d — средний диаметр ступени; l_2 — высота рабочих лопаток; β_2 — угол направления скорости W_2 .

6. Потеря энергии в рабочей решетке вычисляется по формуле (4):

$$\Delta h_{\text{раб.}} = (1 - \psi^2) \frac{W_{2t}^2}{2}, \quad (4)$$

где ψ — коэффициент скорости рабочей решетки.

7. Определяются новые параметры пара в конце процесса по формуле (5), путем движения вниз по изобаре на величину $\Delta h_{\text{раб.}}$:

$$h_{2t} = h_2 - \Delta h_{\text{раб.}} \quad (5)$$

по известным P_2 и h_{2t} находим остальные параметры S_{2t} , V_{2t} .

8. Методами последовательных приближений задавая объем V_1 из условия: $W_{1a} \cong W_{1b}$ по формула (6–9) находим C_1 :

$$W_{1a} = \sqrt{C_1^2 + U^2 - 2UC_1 \cos \alpha_1}, \quad (6)$$

$$\text{где } C_1 = \frac{GV_1}{\pi d l \sin \alpha_1}, \quad (7)$$

$$W_{1b} = \sqrt{W_2^2 t - 2h_2} \quad (8)$$

где $h_2 = h_1 - h_{2t}$, (9); α_1 — угол направления скорости С1; h_1 — энтальпия пара на выходе из сопловой решетки (точка определена пересечением изобары из точки h_{2t} с политропой на номинальном режиме).

9. После чего находится h_1 по известным S_{2t} и V_1 и определяется P_1 .

10. Рассчитывается потеря в сопловой решетке по формуле (10):

$$\Delta h_{con} = (1 - \varphi^2) \frac{C_{1t}^2}{2} \quad (10)$$

где φ — коэффициент скорости сопловой решетки;

11. Определяются новые параметры пара в точке выхода пара из сопловой решетки (11), путем движения вниз по изобаре на величину Δh_{con} :

$$h_{1t} = h_1 - \Delta h_{con} \quad (11)$$

По определенным выше значениям P_1 и h_{1t} находятся S_{1t} и V_{1t} .

12. Параметры торможения потока перед ступенью определяются по формулам (12) и (13):

$$h_0 = h_{1t} + \frac{C_1^2}{2} \quad (12)$$

$$S_0 = S_{1t} \quad (13)$$

По известным h_0 и S_0 определяется P_0 .

13. Если значение P_0 , определенное выше, не совпадает с заданной точностью с давлением торможения на входе в турбину, то корректируется расход G в пункте 5 по формуле (14):

$$G' = G \pm \Delta G \quad (14)$$

14. После совпадения давлений корректируется политропа для совпадения ее начальных параметров с расчетными, путем увеличения V_{2t} до некоего V_{2t}' , пока h_0' не станет равным h_0 .

15. Далее оцениваем изменившиеся значение коэффициентов φ и ψ , и значение работы ступени по формуле (15):

$$L_T = U(C_1 \cos \alpha_1 - C_2 \cos \alpha_2) \quad (15)$$

Учитывая работу, затрачиваемую на трение диска и трение в подшипниках по формулам (16) и (17):

$$\Delta L_{\text{тр.подш}} = f(U^2), \quad (16)$$

$$\Delta L_{\text{тр.диск}} = f(U^2). \quad (17)$$

Условием новой статической величины оборотов ротора, очевидно, является равенство (18):

$$L_T = \Delta L_{\text{тр.подш}} + \Delta L_{\text{тр.диск}}, \quad (18)$$

Предельный заброс оборотов ротора определяется из уравнения (19):

$$U(C_1 \cos \alpha_1 - C_2 \cos \alpha_2) = \Delta L_{\text{тр.подш}} + \Delta L_{\text{тр.диск}}. \quad (19)$$

Если равенство не выполняется, то возвращаемся в пункт 2 и повторяем цикл с новой величиной окружной скорости.

16. Методика расчета на разгон многоступенчатой турбины, в общем, одинакова за исключением следующего: при последующем использовании выходной скорости на следующем колесе параметры за ступенью при известных полных параметрах находятся следующим образом.

Для ступени $(Z-1)$ задается объем V_2 так чтобы $C_{2a} \cong C_{2b}$, согласно формулам (20–22):

$$C_{2a} = \sqrt{W_2^2 + U^2 - 2UW_2 \cos \beta_2}. \quad (20)$$

$$W_2 = \frac{GV_2}{\pi dl_2 \sin \beta_2}. \quad (21)$$

$$C_{2b} = \sqrt{2(h_{0(z)} - h_{2(z-1)})}. \quad (22)$$

где $h_{2(z-1)}$ — находится по двум известным $S_{0(z)}$ и V_2 , так же находятся все остальные параметры P, t .

Вывод: Расчет по данной методике полностью подтвердил экспериментальные данные, полученные на турбине марки ТРБ в промышленных условиях — 5480об/мин, а по расчету 5800об/мин.

Таким образом доказана пригодность приведенной выше методики для расчетов предельной величины разгона турбины.

1. Балабанович В.К., Карницкий Н.Б., Силюк С.М., Спагар И.И., Мазуркевич В.А., Скоробогатый Н.Н., Пантелей Н.В., Пантелей Е.А.

К пуску второй белорусской паровой турбины марки ТРБ// Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений). — 2002 — №4 — С.98.

УДК 621.165

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСТАНОВОК КОМБИНИРОВАННОГО ЦИКЛА ТИПА ЭТУ *

Балабанович В.К., Вербило И.Н., Скоробогатый Н.Н., Пантелей Е.А.,
Пантелей Н.В., Федерякин А.Н., Кулак Е.В., Глазков П.И.
Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

Разработанные алгоритм и программа расчетов позволили получить основные характеристики простейшего варианта установки типа — ЭТУ—1 [1]. И там же приведена методика таких расчетов. Результаты расчетов основных характеристик ЭТУ—1 для одной из серий режимов ее работы приведены на рис. 1.

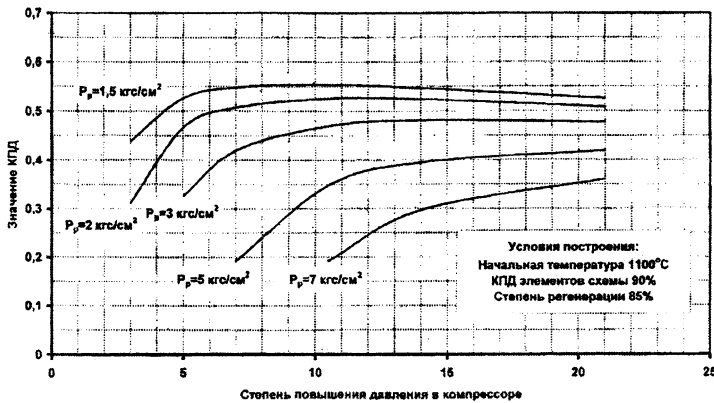


Рис. 1. Зависимость КПД ЭТУ—1 от степени повышения давления в компрессоре для разных величин разделительного давления (P_0) при постоянной начальной температуре рабочего тела перед тепловой машиной

Анализ результатов расчетов полностью подтверждает научно-технические предпосылки, положенные в основу разработки высокоэффективных энерготехнологических установок нового поколения. Представляется важным подчеркнуть два вывода. Снижение разделительного давления в цикле

* — условные обозначения и сокращения в соответствии с [1]

ЭТУ-1 приводит к росту ее внутреннего КПД и смещению его оптимума в сторону меньших значений степени повышения давления в компрессоре. Не менее важной является и пологость характеристик в широком диапазоне изменения начального давления цикла. Эти достоинства показывают на большие преимущества ЭТУ-1 в ее транспортном исполнении. Малая оптимальная величина степени сжатия упрощает как компрессорную, так и тепловую машину, а пологость характеристик гарантирует большие возможности двигателя выполняемого по принципу ЭТУ-1 при его применении в качестве транспортной установки (рис.2).

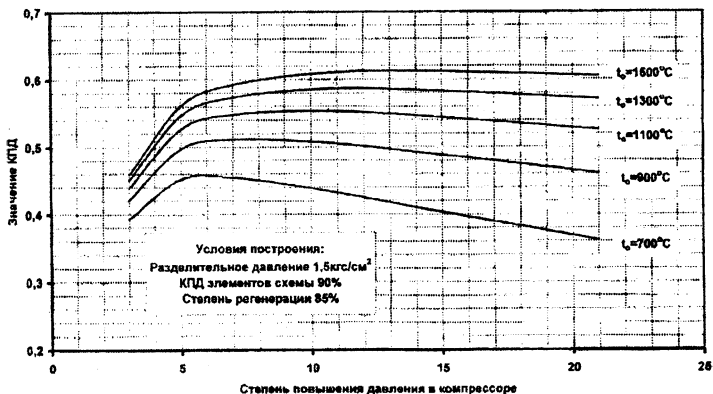


Рис. 2. Зависимость КПД ЭТУ-1 от степени повышения давления в компрессоре для разных значений начальных температур (t_1) рабочего тела перед тепловой машиной

Отметим достаточно высокий внутренний КПД ЭТУ-1. Но этим не ограничиваются ее достоинства. Основными из них являются прежде всего комбинированное производство технологических продуктов и достигаемый при этом экологический эффект обеспечиваемый за счет безотходной технологии такого производства. Можно подчеркнуть также, что тепловая электростанция, выполненная на основе энергоустановок типа ЭТУ, не будет иметь традиционной дымовой трубы.

Усложнение двигателя наращиванием его технологической схемы путем реализации парогазового варианта - ЭТУ-2 дополнительно повышает его эффективность. Принципиальная схема такого варианта дополняется паротурбинной установкой (ПТУ), котел-утилизатор которой включен последовательно в тракт рабочего тела за регенератором вместо теплофикационной

установки у ЭТУ-1. Схема ЭТУ дополнительно может быть усложнена также за счет включения в тракт рабочего тела теплонасосной установки для передачи низкопотенциальной теплоты путем ее трансформации в схему ПТУ, например, для подогрева конденсата пара. Результаты расчетных исследований основных характеристик такого двигателя приведены на рис.3.

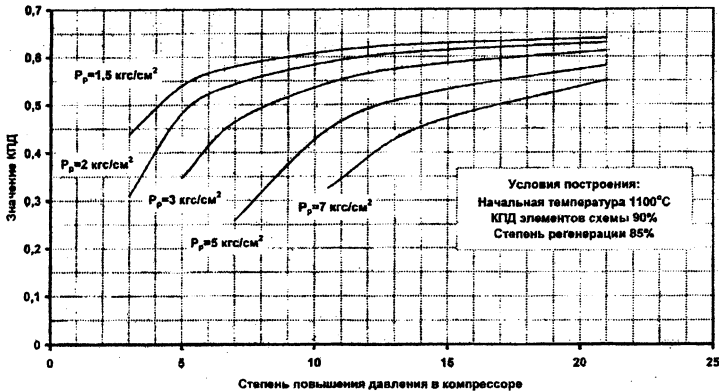


Рис. 3. Зависимость КПД ЭТУ-2 от степени повышения давления в компрессоре для разных величин разделительного давления (P_0) при постоянной начальной температуре рабочего тела перед тепловой машиной

Отличительной особенностью характеристик варианта ЭТУ-2 является повышение его КПД по сравнению с КПД простейшей установки — ЭТУ-1. При достигнутом в газовых турбинах уровне начальных температур 1300 °C величина внутреннего КПД такого двигателя приближается к 70%, что не имеет аналогов. Обращает на себя внимание и факт более высоких значений оптимальной степени повышения давления для ЭТУ-2 по сравнению с вариантом ЭТУ-1. Ее величина для ЭТУ-2 находится на уровне около двадцати (рис.4). Это является дополнительным достоинством варианта ЭТУ-2 при ее использовании в качестве стационарной установки для привода электрического генератора на ТЭС. Высокое давление рабочего тела обеспечит большие форсировочные возможности силовой установки обусловленные ростом расходов рабочего тела за счет повышения плотности среды.

Особенностью энерготехнологических установок типа ЭТУ является то, что они представляют собой упорядоченное соответствующим образом сочетание хорошо известных и достаточно отработанных технологических модулей. Собранные в единую установку они дают новое качество: работу

установки типа ЭТУ в предельном случае по безотходной технологии. Значимость таких технологий очевидна. Вместе с тем, отметим высокую эффективность комбинированного производства ТП, в том числе и по такому продукту как механическая (электрическая) энергия.

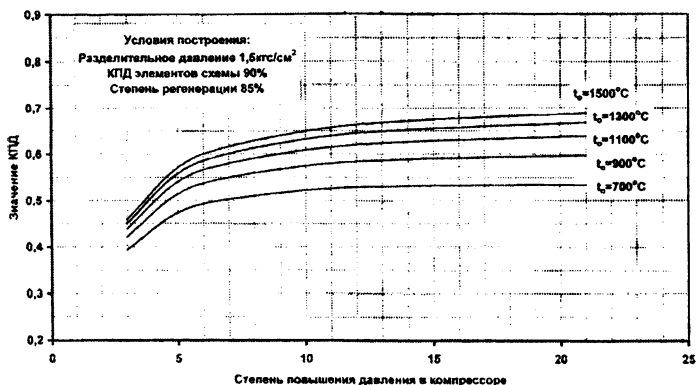


Рис. 4. Зависимость КПД ЭТУ-2 от степени повышения давления в компрессоре для разных значений начальных температур (t_1) рабочего тела

Высокая эффективность энергоустановок типа ЭТУ обусловлена рядом их преимуществ. Среди них — отсутствие необратимых потерь энергии при передаче тепловой энергии от рабочего тела ТМ к рабочему телу РМ, присущих бинарным установкам типа (ПГУ). Здесь имеется ввиду общее рабочее тело тепловой и расширительной машин. Использование скрытой теплоты парообразования водяных паров содержащихся в рабочем теле равноценно использованию высшей теплоты сгорания топлива. В установках типа ЭТУ повышается также и эффективность регенерации за счет внутреннего использования произведенных технологических продуктов в их схеме, например, хладоэнергии для предварительного охлаждения воздуха перед его сжатием в компрессоре, а также вследствие более высокой температуры рабочего тела за газовой турбиной. Возможно использование и произведенной установкой воды для впрыска ее в камеру сгорания и сокращения за счет этого расхода воздуха на охлаждение рабочего тела перед газовой турбиной.

Имеются возможности дальнейшего совершенствования установок на основе применения известных технологических решений, например, ступенчатого подвода тепловой энергии и ступенчатого сжатия воздуха с промежуточным его охлаждением и др. Возможные направления применения установок типа ЭТУ приводятся далее в данном предложении.

Расщепление цикла установок ЭТУ на цикл тепловой и холодильной машин с промежуточным отводом тепловой энергии между ними расширяет функциональные возможности в плане сочетания их с рядом высокотемпературных технологий, например, с технологией конверсии метана в смеси с водой. Такое сочетание технологий на основе ЭТУ является основой комбинированных технологических производств не имеющих альтернативы в будущем.

Литература

1. Балабанович В.К., Вербило И.Н., Скоробогатый Н.Н. и др. Энерготехнологические установки комбинированного цикла (статья в настоящем сборнике). —с.5.

УДК 621.165

ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ КОМБИНИРОВАННОГО ЦИКЛА

**Балабанович В.К., Вербило И.Н., Скоробогатый Н.Н., Пантелей Е.А.,
Пантелей Н.В., Федерякин А.Н., Кулак Е.В., Глазков П.И.**

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

Применение многофункциональных (комбинированных) энерготехнологических установок (ЭТУ) в ближайшем будущем станет основой энергоемких производств. Один из вариантов таких установок представляющей собой сочетание тепловой и холодильной машин объединенных общим рабочим телом приводится ниже (рис.1).

Такая установка обеспечивают комбинированное производство ряда технологических продуктов из рабочего тела получаемого путем сжигания органического топлива в смеси со сжатым воздухом и названа нами как ЭТУ-1. В технологической схеме ЭТУ-1 из продуктов сгорания производится вода (H_2O), углекислота (CO_2), азот (N_2), тепловая- (Q_T), холодо- (Q_X) и механическая энергия (МЭ). В предельном случае такое производство является безотходным, что автоматически обеспечивает получение еще одного продукта – экологического эффекта (ЭК).

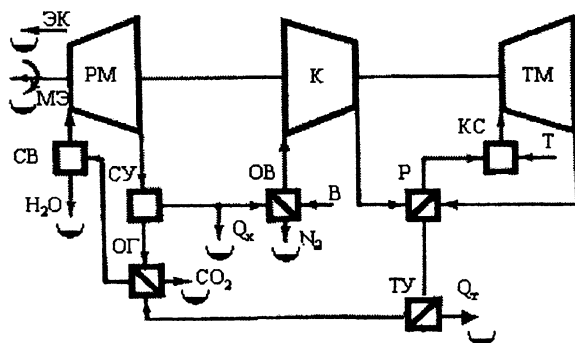


Рис.1. Принципиальная схема энерготехнологической установки ЭТУ-1:

ПМ — расширительная машина; *Р* — регенератор; *К* — компрессор;
ОВ — охладитель воздуха; *ТМ* — тепловая машина; *ОГ* — охладитель газов;
КС — камера сгорания; *ТУ* — теплофикационная установка;
Тн — теплоноситель; *Т* — топливо; *СВ* — сепаратор воды; *В* — воздух;
СУ — сепаратор углекислоты.

На рис.2 приведен термодинамический цикл ЭТУ-1 в ТS-координатах. На нем показаны основные процессы по преобразованию химической энергии органического топлива в технологические продукты в схеме ЭТУ-1: (1–2) — расширение рабочего тела (РТ) в тепловой машине (ТМ) (газовой турбине); (2–3) — охлаждение РТ в регенераторе (Р); (3–4) — охлаждение РТ в теплофикационной установке (ТУ) и охладителе газов (ОГ); (4–5) — расширение РТ в расширительной машине (ПМ) (турбодетандере); (6–5) — охлаждение воздуха (В) в охладителе воздуха (ОВ); (5–7) — сжатие воздуха в компрессоре (К); (7–8) — нагрев воздуха в регенераторе; (8–1) — подвод теплоты топлива (Т) к воздуху в камере сгорания и получение рабочего тела установки. Соответствующий выбор разделительного давления позволяет отделить в сепараторе воду (H_2O) от РТ перед ПМ, а за ней — углекислоту (CO_2) в сублимированном состоянии, в результате остается смесь азота (N_2) с инертными газами (технологические продукты). Там же на рис.2 пунктиром показан также цикл ГТУ с регенерацией в том же диапазоне начальных и конечных параметров рабочего тела. Сравнение обоих циклов убедительно подчеркивает преимущества ЭТУ-1 над ГТУ.

Расчет вариантов схем установок типа ЭТУ выполнялся следующим образом. Задавались основные исходные данные: температура рабочего тела

перед газовой турбиной; начальное и разделительное давления; конечное давление и температура за турбодетандером; вводились необходимые граничные условия для газовой турбины, турбодетандера и компрессора.

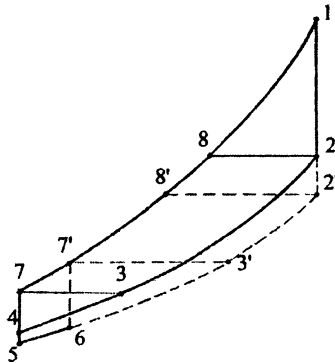


Рис. 2. Термодинамический цикл ЭТУ-1 в TS -координатах

В расчетах расход рабочего тела на входе в компрессор принимался на уровне 100 кг/с , что дает очевидные преимущества. Корректировка расходов по элементам схемы осуществлялась введением коэффициентов расхода — $K_{\text{расх}}$, что позволяет учитывать утечки, отбор воздуха на охлаждение и т.д. Потеря давления в отдельных элементах схемы учитывалась коэффициентом давления — $K_{\text{давл}}$, который учитывает гидравлические потери (на дросселирование) в элементах схемы. Коэффициент состава газов b и их молекулярный вес m в первом приближении приняты для газа соответствующего составу воздуха, то есть ($b=1$) и ($m=28,96 \text{ кг/кмоль}$). Температура рабочего тела за турбодетандером — $t_{\text{вых}}^{\text{ТД}} = -60 \text{ }^\circ\text{C}$. Температура воздуха перед компрессором — $t_{\text{вх}}^{\text{К}} = -50 \text{ }^\circ\text{C}$. Коэффициент полезного действия камеры сгорания принимался — $\eta_{\text{кс}} = 0,99$. Давление воздуха на входе в компрессор и за турбодетандером принималось на уровне атмосферного $P_{\text{к}} = 0,1 \text{ МПа}$.

По разработанной авторами компьютерной программе, основанной на термодинамических таблицах для воздуха и продуктов сгорания [2], определялись основные параметры рабочего тела в расчетных точках схемы ЭТУ-1. Теплосодержание — i_1 и энтропия — S_1 начальной точки процесса расширения перед газовой турбиной определялись по заданным граничным условиям. Конечная точка адиабатического процесса расширения в газовой турбине определялась в соответствии с величиной относительного давления

$$b^{\Gamma T} = P_1 / P_{\text{разд}} \quad (1)$$

где P_1 и $P_{\text{разд}}$ — начальное и конечное (разделительное) давление рабочего тела турбины. Энтропия (мольная) перед турбиной определялась как

$$S_1^{\text{ГТ}} = \phi(\beta^{\text{ГТ}}, t_1), \quad (2)$$

С учетом этого определялась адиабатная температура за турбиной $t_{2\text{ГТ}}^{\text{ад}}$. По ней определялось конечное (на адиабате) теплосодержание рабочего тела за турбиной — $i_{2\text{ГТ}}^{\text{ад}}$. Адиабатический тепловой перепад газовой турбины составит

$$H_0^{\text{ГТ}} = i_1 - i_{2\text{ГТ}}^{\text{ад}}, \quad (3)$$

Введением поправки на коэффициент полезного действия цикла установки получаем использованный ею тепловой перепад — H_t . Для определения истинного значения расхода $G^{\text{ГТ}}$ используем коэффициент $K_{\text{расх}}$. Тогда мощность газовой турбины определяется как

$$N_1^{\text{ГТ}} = G^{\text{ГТ}}_{\text{ист}} H_t / \mu, \quad (4)$$

Аналогичным образом вычислялись мощности турбодетандера — $N_i^{\text{ТД}}$ и компрессора — $N_i^{\text{К}}$, а также конечная температура воздуха за компрессором.

Суммарная мощность установки составит

$$\Sigma N = N_i^{\text{ГТ}} + N_i^{\text{ТД}} - N_i^{\text{К}}, \quad (5)$$

Температура газов за регенератором принималась с учетом температурного напора $d t = 15^\circ\text{C}$, то есть

$$t_{\text{ГТ}} = t_{\text{КК}} + \delta t, \quad (6)$$

где $t_{\text{КК}}$ — температура воздуха за компрессором.

Тогда теплосодержание рабочего тела за турбиной определится как

$$i_2^{\text{ГТ}} = i_1^{\text{ГТ}} - H_t, \quad (7)$$

а теплосодержание воздуха за регенератором — как

$$i_{\text{вп}} = i_{\text{КК}} + (i_2^{\text{ГТ}} - i_{\text{ГТ}}), \quad (8)$$

где $i_{\text{сп}}$ — теплосодержание рабочего тела (газов) за регенератором — по температуре $t_{\text{сп}}$, а $i_{\text{КК}}$ — теплосодержание воздуха за компрессором определялась по температуре за ним.

Удельное количество теплоты подводимой к рабочему телу в камере сгорания установки определится из выражения

$$q_{\text{кс}} = i_1^{\text{ГТ}} - i_{\text{сп}}, \quad (9)$$

Количество теплоты подведенное к рабочему телу в цикле установки составит

$$Q_0 = G_{\text{кс}} q_{\text{кс}} / \mu \eta_{\text{кс}}, \quad (10)$$

где $G_{\text{кс}}$ — расход рабочего тела на выходе из камеры сгорания.

Внутренний КПД установки определялся из выражении

$$\eta_i = \Sigma N / Q_0. \quad (11)$$

При более сложных вариантах схем установок сохранен приведенный выше методический подход к расчетам с соответствующей корректировкой алгоритма. В заключение отметим, что контролировались так же материальные и тепловые балансы в узловых точках рассчитываемых схем.

Литература

1. Коротков В.А., Неуймин В.М., Балабанович В.К. и др. Возможные перспективы участия СП «Интертурбо» в техническом перевооружении и реконструкции тепловых электростанций России и Белоруси. Известия ВУЗов и энергетич. объединений СНГ. Энергетика. — 2002 г. — №2. — С.51–59.
2. Ривкин С.Л. Термодинамические свойства воздуха и продуктов сгорания топлив: Справочник. — 2-е изд. перераб. — М.: Энергоиздат. — 1984 г. — с.104.

УДК 621.181

ДВУХСТУПЕНЧАТОЕ СЖИГАНИЕ ПРИРОДНОГО ГАЗА В КОТЛАХ

Жихар И.Г.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

Двухступенчатое сжигание топлива является эффективным методом снижения выбросов оксидов азота. В энергетике двухступенчатое сжигание газа применяется в двух вариантах. Первый вариант двухступенчатого сжигания реализуется путем перераспределения дутьевого воздуха по ярусам горелок. В нижний ярус горелок подается богатая топливная смесь, а в верхний ярус — смесь с избытком дутьевого воздуха или дополнительного воздуха. Этот способ двухступенчатого сжигания получил название поярусного регулирования. Другой вариант двухступенчатого сжигания может быть реализован в специальных горелочных устройствах, в которых осуществляется перераспределением потоков топлива и воздуха с образованием на первой стадии либо бедной топливно-воздушной смеси с последующим добавлением необходимого количества топлива, либо богатой топливно-воздушной смеси и подводом на второй стадии воздуха для дожигания продуктов неполного сгорания первичной зоны горения.

При организации двухступенчатого сжигания топлива с позонной подачей на первой ступени осуществляется процесс горения с коэффициентом из-

бытка воздуха $\alpha < 1$, затем на некотором расстоянии от первой зоны горения подается остальное количество воздуха, необходимого для полного выгорания топлива. В этом случае существенно снижается выход оксидов азота. Для практической реализации двухступенчатого сжигания газа и мазута разработана новая газомазутная горелка (авторское свидетельство СССР № 964350).

Двухступенчатое сжигание газообразного топлива реализовано на котле ДКВР-10-13 при помощи специальных горелочных устройств. Испытания котла ДКВР-10-13 с новыми горелками проводилось при сжигании природного газа с теплотой сгорания $35,77 \text{ МДж/м}^3$. Диапазон изменения нагрузки составлял от 1,39 до 2,78 кг/с при этом температура уходящих газов увеличилась с 109°C до 130°C , а коэффициент избытка воздуха в уходящих газах снизился с 1,57 до 1,31. Изменение потери теплоты с уходящими газами в зависимости от нагрузки котла показывает, что с увеличением нагрузки с 1,39 до 2,78 кг/с она возрастает с 3,4 % до 4,3 %. В этом же диапазоне изменения нагрузки давление газа перед горелками увеличивается с 784 Па до 2940 Па, а давление первичного воздуха перед горелками возрастает с 196 Па до 588 Па.

При испытаниях котла определялась концентрация оксидов азота в уходящих газах с помощью прибора «Testo 33».

При использовании заводских горелок на котле при изменении нагрузки от 1,39 до 2,78 кг/с концентрация оксидов азота в уходящих газах изменялась от 142 мг/м^3 до 190 мг/м^3 .

При установке на котле новых горелок для двухступенчатого сжигания газа при тех же условиях концентрация оксидов азота в уходящих газах изменялась от 67 мг/м^3 до 90 мг/м^3 .

Следовательно, установка новых горелок на котле для двухступенчатого сжигания газа позволила снизить концентрацию оксидов азота в уходящих газах в 2,1 раза.

При изменении нагрузки с 1,39 до 2,78 кг/с КПД «брутто» котла увеличивается с 93,2 % до 94,0 %.

При использовании заводских горелок на котле при нагрузке 2,78 кг/с КПД котла «брутто» составлял 92,4 %. Таким образом, установка новых горелок для двухступенчатого сжигания газа на котле позволила увеличить КПД «брутто» котла на 1,6 %, что объясняется полным сжиганием газа (химический недожог отсутствует на всех нагрузках котла), уменьшением коэффициента избытка воздуха за счет более совершенного смешения газа и воздуха и уменьшения температуры уходящих газов. Длина факела в топке стала значительно короче. Факел не касается экранных труб, максимальная температура в факеле снизилась. За счет этого надежность и долговечность работы экранных труб увеличилась.

Результаты испытаний показали, что котел работает устойчиво во всем диапазоне изменения нагрузки, кроме того допускает длительную перегрузку котла по производительности до 4,17 кг/с.

УДК 621.181

ОСОБЕННОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ И ЭКОНОМИЧНОСТИ ТЭС В УСЛОВИЯХ РЫНОЧНОЙ ЭКОНОМИКИ

Карницкий Н.Б., Буров А.Л., Рус В.В.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

В современных условиях требуется пересмотр традиционных методов и средств управления надежностью. Особое внимание должно быть уделено экономической стороне проблемы и поиску средств повышения надежности в условиях перехода к рынку.

Технологический процесс на современных ТЭС имеет ряд особенностей, которые должны учитываться при обеспечении ее функционирования. В частности, к ним относятся: иерархическая структура; производство и отпуск нескольких видов продукции, потребляемых неравномерно; обеспечение работы ТЭС на частичных нагрузках при отказах оборудования; разнообразие технических средств обеспечения надежности; проведение регулярных планово-предупредительных ремонтов и техобслуживания.

Т.о. необходимый уровень надежности может быть обеспечен различными путями и средствами, требующими различных затрат. Теоретически существует оптимальный уровень надежности, и в принципе можно было бы говорить об экономических аспектах этой проблемы.

В условиях рынка величина норматива надежности требует корректировки в сторону ее увеличения. В странах с развитой рыночной экономикой этот норматив в настоящее время соответственно равен: США, Канада—0,9997; Италия, Ирландия—0,9995; Япония—0,9992.

Применительно к энергетике Республики Беларусь, входящей в состав СНГ, норматив надежности на уровне 2005 года должен составить 0,996–0,999, а к 2010 году возрасти до 0,9991. Следует учесть и тот факт, что к этому времени необходимо иметь резерв мощности на проведение капитальных и средних ремонтов в условиях старения оборудования до 60–70% от паркового ресурса.

На практике сочетать надежность и экономичность удается не всегда, поскольку возникают трудности выражения ненадежности системы в стоимостной форме. Часто вынужденно эти понятия рассматривают раздельно, косвенно объединяя их через нормативы.

Оптимальная надежность ТЭС определяется таким ее уровнем, дальнейшее поддержание которого экономически нецелесообразно при технических требованиях к состоянию оборудования на момент оптимизации.

Задача экономического обоснования уровня надежности определена в [1].

$$\max \Delta_{\text{инт}}(H) = \max \sum_{t=0}^{T_p-1} [P_t(H) - Z_t(H)] \frac{1}{(1+E)^t}, \quad (1)$$

где $\Delta_{\text{инт}}(H)$ — чистый дисконтированный доход; $P_t(H)$ — результаты, достигнутые на t -ом шаге расчета; $Z_t(H)$ — затраты, инвестируемые на t -ом шаге расчета; H — надежность отпуска энергии; T_p — расчетный период; E — норма дисконта; $P_t(H) - Z_t(H) = \Delta_t(H)$ — эффект достигаемый на t -ом шаге.

Здесь максимальному значению $\Delta_{\text{инт}}(H)$ соответствует оптимальное значение надежности отпуска энергии.

В электроэнергетике проблема надежности и экономичности энергоснабжения решается довольно активно, причем, используя вероятностные методы, ученые и практики значительно продвинулись в решении этих вопросов.

Данные опроса 29 государств касательно используемых критериев надежности выделили общие точки зрения [2]. На первое место вышло требование экономической обоснованности, затем пригодность использования детерминированных и вероятностных моделей. Для иллюстраций сказанного определим вероятность потери $J_k(\Delta P)$ нагрузки.

$$J_k(\Delta P) = \frac{Z_{\text{уд}}}{(y_0/T)}, \quad (2)$$

где $Z_{\text{уд}}$ — удельные затраты в генерирующую мощность; y_0 — удельный ущерб от недоотпуска электроэнергии. По различным оценкам y_0 составляет от 0,5 до 6,85 кВт·ч в зависимости от категории потребителя; T — расчетный период.

В СНГ нормируется вероятность бездефективной работы или показатель (индекс) расчетной надежности энергосистемы

$$D = 1 - J_k(\Delta P) = 1 - 0,004 = 0,996, \quad (3)$$

Очевидно, ожидаемый недоотпуск электроэнергии составляет

$$M_k(\Delta P \cdot h) = J_k(\Delta P)T, \quad (4)$$

и при $T=8760$ часов $M_k(\Delta P \cdot h) = 0,004 \cdot 8760 = 35$ ч

Произведение полученного значения $M_k(\Delta P \cdot h)$ на величину удельного ущерба y_0 , определит интегральный ущерб от ненадежности.

В практике эксплуатации теплоэнергетического оборудования ТЭС проблема надежности может быть решена со значительно большими допущениями, но и в этом направлении исследований явно недостаточно. Уже давно существуют нормативные методы (тепловой, гидравлический, аэродинамический, прочностной). Широко применяются такие экономические нормы, как удельные расходы топлива на производство электроэнергии и теплоты. Нормативы же по надежности практически отсутствуют, а те показатели надежности, которые и учитываются при составлении отчетов и других документов, никоим образом не способны осуществлять прогнозные оценки, а лишь констатируют факты отказов и аварий. При лавинообразном старении энергооборудования пренебрежение надежностью может привести к нежелательным последствиям.

На рисунке 1 изображен процесс выбора нормированного значения какого-либо показателя надежности «ПН». Следует оговориться, что нормирование показателей надежности на основе экономических оценок возможно лишь в случае стоимостного выражения ущерба от ненадежности. Однако в ряде случаев при формировании решений удобнее пользоваться заранее выбранным значением \bar{P} , не вычисляя в каждом конкретном случае значений ущерба $У/3$. Зависимости $P(U)$ и $P(3+U)$ практически могут быть представлены в виде заштрихованных зон (см. рис. 1), в пределах которых экспертно выбирается значение \bar{n} (без вычисления $У$), используемого в качестве нормативного.

Нормирование показателей надежности, как правило, основано на прошлом опыте с использованием ретроспективного анализа и оценки их применимости на перспективу. Отметим, что конфигурация кривых (см. рис. 1) в постановке задачи общеизвестна и следует только присвоить носителям ординаты и абсциссы свои обозначения и численные значения.

Достижение показателя надежности сверх нормативного $N_{\text{норм}}$ нецелесообразно, поскольку затраты на его увеличение существенно превышают размер ущерба. Следовательно, нормирование надежности — это технико-экономическая задача.

На практике не всегда удается определить величину ущерба, вызванную именно отказом того или иного элемента структуры ТЭС. Здесь можно воспользоваться экспериментальными исследованиями. Существование зоны больших затрат и малых приростов показателей надежности позволяет экспертным путем определить нормативное значение последнего. В энергетической практике и этот метод не всегда применим, поскольку подобные эксперименты на мощном оборудовании достаточно дороги, а в ряде случаев опасны.

Действующие в настоящее время нормативно-методические документы не предусматривают экономического обоснования нормативных значений показателей надежности. Нормирование показателей надежности основывается только на накопленном опыте, и роль нормативов и в Беларуси, и в России невелика.

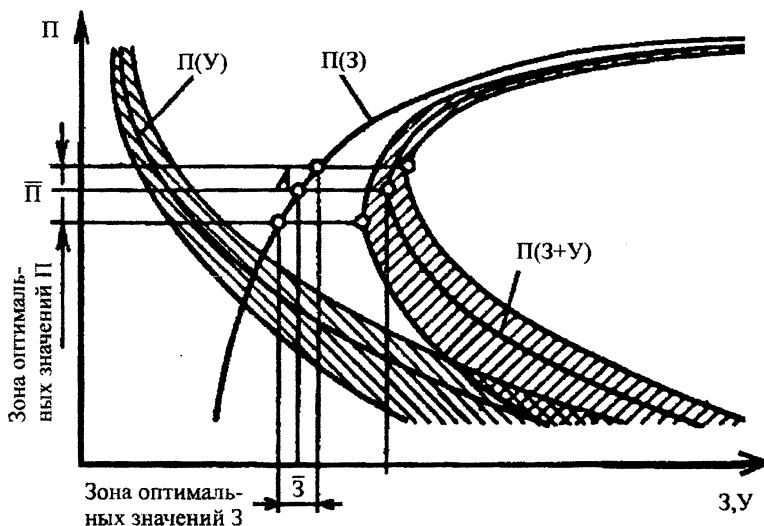


Рис. 1. Процесс нормирования показателя надежности на основе экономических оценок. Условные обозначения:

P — показатель надежности; $P(Y)$ — зависимость показателя надежности от ущерба при его снижении; $P(Z)$ — зависимость показателя надежности от затрат на его поддержание; \bar{P} — экономически оптимальное значение показателя надежности соответствующее оптимальным затратам \bar{Z} ; $P(Z+Y)$ — зависимость показателя надежности от суммарных затрат и ущерба; $Z+Y=\min$ — оптимальные затраты, приводящие к поддержанию надежности на требуемом уровне.

Важнейшим условием для определения показателей надежности ТЭС является достоверная и наиболее полная исходная информация.

Конечно, имеются сложности с получением ее от эксплуатационников, поскольку система сбора, обработки и анализа ретроспективной информации

несовершенна. В нашем случае собрана исходная информация о работе теплоэнергетического оборудования ряда ТЭС Белоруссии и России за длительный период их работы (в отдельных случаях с начала эксплуатации), что позволило провести ее анализ, предложить новое методическое обеспечение по расчету показателей надежности и подходы к синтезу и анализу надежности и экономичности основного теплоэнергетического оборудования ТЭС.

Литература

1. Попырин Л.С. Методы обоснования надежности тепловых электростанций // Вестник электроэнергетики. — 1997. — № 1. — С. 28–39.
2. Критерии надежности, используемые при планировании генерирующей мощности /Ю.Н. Балаков, В.М. Лаврентьев, Б. Н. Неклепаев и др.// Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики: Сб.ст. — СПб.: ПЭИПК, 1997. — Вып. 49. — С. 50–57.
3. Надежность систем энергетики и их оборудования: В 4 т./Энергоатомиздат. — М., 1994. — Т.1: Справочник по общим моделям анализа и синтеза надежности систем энергетики /Ред. Ю.Н.Руденко. — 1994. — 480с.

ЕСТЕСТВЕННЫЕ И ТОЧНЫЕ НАУКИ

УДК 539.214

ОБ ОДНОМ ВАРИАНТЕ ТЕОРИИ ПЛАСТИЧНОСТИ В КОНЕЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЯХ

Нифагин В. А.

Белорусский национальный технический университет

Минск, Беларусь

Среди основных типов теорий пластичности, получивших распространение в последнее время центральное место занимает класс теорий, в основу которых положено представление о предельных поверхностях нагружения и деформирования. При этом для теорий, описывающих малые упругопластические деформации принимается существование функции нагружения $f(\sigma_{ij}, \epsilon_{ij}^p, \chi)$, удовлетворяющей уравнению

$$f(\sigma_{ij}, \epsilon_{ij}^p, \chi) = 0 \quad (1)$$

где $\sigma_{ij}, \epsilon_{ij}^p$ — тензоры напряжений и пластических деформаций, χ — множество параметров, зависящих от истории нагружения, представляющих функционалы траекторий нагружения и деформирования в пространствах $\sigma_{ij}, \epsilon_{ij}$. Определяющее соотношение такой теории обычно представляет собой неравенство

$$\int \sigma_{ij} d\epsilon_{ij} \geq 0 \quad (2)$$

неотрицательности работы внутренних сил в элементе среды на любом замкнутом по деформациям цикле. Применительно к теориям с поверхностью нагружения следствием из неравенства (2) является основное неравенство пластичности

$$(\sigma_{ij} - \sigma_{ij}^0) \delta \epsilon_{ij}^p \geq 0 \quad (3)$$

где $\sigma_{ij}^0, \sigma_{ij}$ — напряжения на поверхности нагружения и вне ее, $\delta \epsilon_{ij}^p$ — приращение пластических деформаций в цикле. Относительно последнего предполагается, что он начинается и заканчивается внутри поверхности (1) и содержит малый участок вне последней. В случае, когда приращение напряжений $\delta \sigma_{ij}$ на участке вне поверхности мало, неравенство пластичности имеет вид

$$\delta \sigma_{ij} \delta \epsilon_{ij}^p \geq 0 \quad (4)$$

Из (3) для регулярных (без угловых точек) поверхностей нагружения вытекает выпуклость последней и искомое соотношение для бесконечно малого приращения деформаций:

$$d\varepsilon_{ij}^p = dk \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} \quad (5)$$

Равенство (5) представляет с геометрической точки зрения градиентальность приращения пластических деформаций к поверхности нагружения. Определяющее соотношения таких теорий (теорий течения) на основе (4) имеют вид

$$d\varepsilon_{ij}^p = \begin{cases} d \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} \frac{\partial f}{\partial \sigma_{mn}} d\sigma_{mn}, & \text{активный процесс} \\ 0 & \text{, пассивный процесс} \end{cases}$$

Активный и пассивный процесс при этом различаются накоплением на шаге $d\sigma_{mn}$ дополнительных пластических деформаций, что происходит при выходе процесса нагружения вне поверхности (1) с условиями

$$f = 0, \quad d'f = \frac{\partial f}{\partial \sigma_{mn}} d\sigma_{mn} \quad (7)$$

или их отсутствии, если

$$f < 0 \quad \text{или} \quad f = 0, \quad d'f \leq 0 \quad (8)$$

Условие градиентальности (5) и ассоциированный закон пластичности (6) — (8) являются следствием более общего принципа макродетерминизма, согласно которому если для двух близких траекторий в пространстве напряжений установлено взаимнооднозначное соответствие так, что расстояние между соответствующими точками меньше δ , то расстояние между отвечающими им точками полученных путей деформирования будет меньше $\eta(\delta)$, причем $\eta \rightarrow 0$ при $\delta \rightarrow 0$.

Система определяющих уравнений пластичности должна включать закон упругой разгрузки, условие нагружения и ассоциированный закон пластичности.

Для описания процессов обратимого (упругого) деформирования элемента сплошной среды, достаточно кинематических величин, образующих, так называемую, энергетическую согласованную пару: тензор напряжений S и тензор деформаций Коши ε_1 . Для процессов, приводящих к необратимому изменению геометрии элемента требуется дополнительное выделение (в явном или неявном виде) параметров тензорного характера, отражающих остаточную (неупругую) часть деформации. Этот вопрос в геометрически линейных теориях получил удовлетворительное решение, применительно к случаю конечных деформаций не имеет общепринятого разъяснения.

Введем симметричный тензор метрики актуального состояния в виде

$$Q = \nabla r \cdot L \cdot \nabla r^T \quad (9)$$

где тензор-градиент ∇r связывает начальное и актуальное состояние элемента, L — симметричный вспомогательный тензор второго ранга, изменяющийся лишь в активном процессе. При разгрузке L — фиксирован с точностью до жесткого вращения начальной конфигурации.

Представим в виде мультипликативного разложения тензор-градиент

$$\nabla r = \Phi_e^{-1} \cdot \Phi_p^{-1} \quad (10)$$

Тогда совмещение представлений (10) возможно, если записать

$$Q = \Phi_e^{-1} \cdot \Phi_p^{-1} \cdot L \cdot \Phi_p^{-1T} \cdot \Phi_e^{-1T}$$

и принять

$$L = \Phi_p \cdot \Phi_p^T; \quad Q = \Phi_e^{-1} \Phi_e^{-1T} \quad (11)$$

По теореме о полярном разложении

$$\Phi_e = O_e \cdot V_e = U_e \cdot O_e; \quad \Phi_p = U_p \cdot O_p = O_p \cdot V_p \quad (12)$$

где U, V — тензоры чистой деформации, O_e, O_p — ортогональные тензоры сопутствующих деформации поворотов. Тогда с учетом (11) тензоры в (9) запишутся

$$L = U_p^2; \quad Q = (O_e \cdot V_e)^{-1} \cdot (O_e \cdot V_e)^{-1T} = V_e^{-1} \cdot V_e^{-1} = V_e^{-2} \quad (13)$$

и зависят только от чистой деформации.

Можно доказать, что представление (9) снимает вопрос о неединственности разгруженной конфигурации элемента K_p . Так как

$$(V_e^{-1})^{**} = O^T \cdot V_e^{-1} \cdot O; \quad O_e^{**} = O_e \cdot O; \quad O_p^{**} = O_o^T \cdot O_p \quad (14)$$

$$U_p^{**} = O_o^T \cdot U_p \cdot O_o$$

То согласно (13), (14) вращение O актуальной или разгруженной K_p конфигурации не влияет на тензор пластичности U_p, L .

Для установления связи между скоростями упругих и пластических деформаций вычислим

$$\frac{dQ}{dt} = \nabla r \cdot \frac{dL}{dt} \cdot \nabla r^T - \nabla V \cdot Q - Q \cdot \nabla V^T$$

откуда

$$\frac{\delta Q}{\delta t} = \nabla r \cdot \frac{dL}{dt} \cdot \nabla r^T \quad (15)$$

Обозначая ϵ_e , ϵ_p — тензоры упругой и пластической деформации

$$\epsilon_e = \frac{1}{2}(E - Q); \quad \epsilon_p = \frac{1}{2}(L - E)$$

первый из которых имеет структуру типа Альманзи, второй, как и тензор L — структуру типа Коши.

С учетом равенства

$$\frac{\delta E}{\delta t} = \nabla V + \nabla V^T = 2D$$

внося Q и L в (15) находим

$$D = \frac{\delta \epsilon_e}{\delta t} + \nabla r \cdot \frac{d\epsilon_p}{dt} \cdot \nabla r^T = \frac{\delta \epsilon_e}{\delta t} + \epsilon_p^o \quad (16)$$

Таким образом, как и необходимо в кинематике необратимых сред равенство полной скорости деформации и суммы скоростей упругой и пластических деформаций выполняется.

Тогда, домножая (16) слева на ∇R и справа на ∇R^T , находим

$$\frac{de}{dt} = \frac{d\hat{\epsilon}_e}{dt} + \frac{d\epsilon_p}{dt} \quad (17)$$

здесь e — тензор полной деформации, $\hat{\epsilon}_e$ — тензор упругой деформации, полученный из аналогичной деформации Альманзи ϵ_e переходом в базис r^k

$$\hat{\epsilon}_e = \nabla R \cdot \epsilon_e \cdot \nabla R^T$$

На основе представления (9) можно, в частности, получить определяющие соотношения теории пластичности.

Неравенство пластичности

$$(\xi(B) - \xi(A)) \cdot (dl \cdot l^{-1} + l^{-1} \cdot dl) \geq 0$$

Условие градиентальности приращения пластической меры

$$dp = dl \cdot l^{-1} + l^{-1} \cdot dl = dm \cdot \frac{\partial f}{\partial \xi} \quad (dm \geq 0)$$

где $\xi = \sqrt{I_3(G)} \cdot \rho^{-1} \cdot T \cdot \rho$ — симметричный вспомогательный тензор напряжений.

Цикл ω начинается внутри поверхности деформирования в точке А, выходит на поверхность в точке В, а затем вне ее на малом участке ВС. Из точки С происходит упругая разгрузка внутрь новой поверхности. Пластическая часть l постоянна на АВ, изменяется от l до $l + dl$ на ВС и далее сохраняется на участке CD.

Определяющие уравнения теории пластичности типа течения запишутся

$$dp = \begin{cases} \frac{\partial f}{\partial \eta} dm, & f = 0, \quad dm \geq 0 \\ 0, & f < 0 \quad \text{или} \quad f = 0, \quad dm < 0 \end{cases}$$

Таким образом, полученные определяющие соотношения являются корректными для описания конечных упругопластических деформаций сплошной среды и обладают рядом преимуществ в сравнении с ранее предложенными.

УДК 539.214

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ ПАКЕТОВ MATHCAD, MATLAB ПРИ ИЗУЧЕНИИ ВЫСШЕЙ МАТЕМАТИКИ

Анисимов В.Я., Голубева В.И., Нифагин В.А.

Белорусский национальный технический университет

Минск, Беларусь

Кафедрой разработан комплекс лабораторных работ по курсу информатики, позволяющий научить студентов решать ряд задач с помощью математических пакетов Mathcad и Matlab: численные методы решения уравнений и оптимизация функций, численные методы решения обыкновенных дифференциальных уравнений, аппроксимация функций методом наименьших квадратов, интерполирование функций.

Для всех лабораторных работ разработана единая оболочка, которая позволяет расширять комплекс по мере добавления новых тем.

Каждая лабораторная работа включает:

1. Цель работы;
2. Теоретическую часть;
3. Варианты (несколько заданий с указанием уровня сложности);
4. Примеры выполнения каждого задания;
5. Контрольные вопросы.

Из любой части лабораторной работы с помощью гиперссылок можно легко попасть в любую другую. Можно открыть сразу несколько окон с информацией из разных частей. Например, задание, соответствующая теоретическая информация и пример выполнения в Matlab аналогичного задания.

Студент получает лабораторную работу с номером своего варианта и, пользуясь указаниями об уровне сложности заданий, начинает ее выполнять в соответствующем математическом пакете.

Проиллюстрируем сказанное примером выполнения лабораторной работы «Аппроксимация функций методом наименьших квадратов» в пакете Mathcad:

ЗАДАНИЕ № 1

Функция $f(z) = \sin(\sqrt{z})$ вычислена в точках $\{x_i\}$. Результаты вычисления функции с точностью до трех знаков после запятой представлены в табл. 1.

Таблица 1

<i>x</i>	1	1,3	1,6	1,9	2,2	2,5	2,8	3,1
<i>f(x)</i>	0,841	0,996	0,899	0,499	0,121	0,725	1,000	0,735

Методом наименьших квадратов по данным представленным таблицей 1, найти функциональную зависимость (прямая, $a+bx$; парабола, $a+bx+cx^2$; парабола третьего порядка $a+bx+cx^2+dx^3$), описывающую эти данные. Проанализировать качество аппроксимации с помощью этих кривых. Построить графики полученных функций, отобразив на этом графике точками табличные данные.

Ход выполнения задания

N — наивысшая степень аппроксимирующего полинома

$$N1 := 1$$

$$N2 := 2$$

$$N3 := 3$$

$$i1 := 0 .. N1$$

$$i2 := 0 .. N2$$

$$i3 := 0 .. N3$$

$$k1 := 0 .. N1$$

$$k2 := 0 .. N2$$

$$k3 := 0 .. N3$$

2. Формирование систем нормальных уравнений

$$a_{1k1} := \sum_{j=0}^n (x_j)^{1+k1} \quad a_{2k2} := \sum_{j=0}^n (x_j)^{2+k2} \quad a_{3k3} := \sum_{j=0}^n (x_j)^{3+k3}$$

$$b_{1k1} := \sum_{j=0}^n (x_j)^{1k1} \cdot f(x_j) \quad b_{2k2} := \sum_{j=0}^n (x_j)^{2k2} \cdot f(x_j) \quad b_{3k3} := \sum_{j=0}^n (x_j)^{3k3} \cdot f(x_j)$$

С₁ и b₁ матрицы коэффициентов и вектор-столбец свободных членов для многочлена наилучшего квадратического приближения степени j. С и b матрицы коэффициентов и вектор-столбец для свободных членов для интерполяции z_k

$$b_{1^T} = (0.655 \quad -2.632)$$

$$b_{2^T} = (0.655 \quad -2.632 \quad -13.387)$$

$$b_{3^T} = (0.655 \quad -2.632 \quad -13.387 \quad -46.313)$$

$$a_1 = \begin{pmatrix} 8 & 16.4 \\ 16.4 & 37.4 \end{pmatrix}$$

$$a_2 = \begin{pmatrix} 8 & 16.4 & 37.4 \\ 16.4 & 37.4 & 92.168 \\ 37.4 & 92.168 & 239.748 \end{pmatrix}$$

$$a_3 = \begin{pmatrix} 8 & 16.4 & 37.4 & 92.168 \\ 16.4 & 37.4 & 92.168 & 239.748 \\ 37.4 & 92.168 & 239.748 & 647.547 \\ 92.168 & 239.748 & 647.547 & 1.797 \times 10^3 \end{pmatrix}$$

3. Решение нормальной системы C_jA=b_j находим, используя обратную матрицу

$$A_1 := a_1^{-1} \cdot b_1$$

$$A_2 := a_2^{-1} \cdot b_2$$

$$A_3 := a_3^{-1} \cdot b_3$$

где коэффициенты искомого многочленов равны соответственно

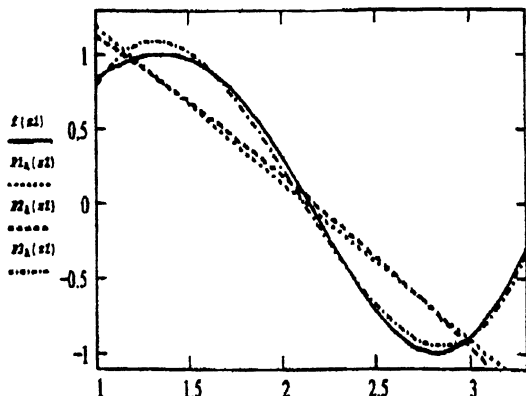
$$A_1^T = (2.238 \quad -1.052) \quad A_2^T = (1.827 \quad -0.6 \quad -0.11)$$

$$A_3^T = (-6.041 \quad 12.811 \quad -7.114 \quad 1.139)$$

а многочлены наилучшего среднеквадратичного приближения имеют вид:

$$P1_A(z) = \sum_{k=0}^{M1} A1_k \cdot z^k \quad P2_A(z) := \sum_{k=0}^{M2} A2_k \cdot z^k \quad P3_A(z) = \sum_{k=0}^{M3} A3_k \cdot z^k$$

4. Графики функции $f(z) = \sin(\sqrt{z^3})$ и аппроксимирующих многочленов $P1_A(z)$, $P2_A(z)$ и $P3_A(z)$



Удобный графический интерфейс позволяет студенту уже на стадии выполнения убедиться в правильности результата.

Перед выполнением комплекса работ студент выполняет сделанную в той же оболочке лабораторную работу, обучающую обращению с математическим пакетом.

Литература:

1. В.Я. Анисимов, В.И. Голубева, В.А. Ибрагимов « Комплекс лабораторных работ по теме « Приближение функций», 2000. Лабораторный практикум.

ИНТЕРПОЛЯЦИЯ НА СИМПЛЕКСАХ

Бокуть Л.В.

*Белорусский национальный технический университет**Минск, Беларусь*

При инженерном проектировании часто возникают задачи расчета электромагнитных полей и параметров, которые можно свести к решению дифференциальных уравнений 2-го порядка с частными производными. Этот факт указывает на возможность эффективного использования метода конечных элементов для нахождения приближенного решения неоднородного скалярного уравнения Гельмгольца.

Неоднородное уравнение Гельмгольца имеет вид:

$$\operatorname{div}(p\nabla u) + k^2 u = g, \quad (1)$$

где $u=u(x,y,z)$ — потенциал, $p(x,y,z)$ — функция, определяющая материальные свойства рассматриваемой среды, величина k^2 определяется условиями задачи, $g(x,y,z)$ — заданная функция источника.

На замкнутой поверхности S заданы граничные условия: либо условие Дирихле (на части S_1 поверхности S задано u), либо однородное условие Неймана (на части S_2 задано $n\nabla u = 0$, где n — единичный вектор нормали к поверхности S).

Приведенная формальная постановка задачи объясняется тем, что неоднородное уравнение Гельмгольца обладает определенной общностью, что позволяет использовать его для формулировки различных физических задач, в частности для задач электромагнетизма.

Для того чтобы построить приближенное решение задачи по определению потенциала используется следующий метод.

Область определения разбивается на треугольники, и на каждом треугольнике потенциальная функция представляется в виде линейной комбинации аппроксимирующих функций. Сущность метода заключается в унифицированной аппроксимации потенциала внутри каждого конечного элемента и подборе таких распределений потенциала в различных элементах, при которых сохранялась бы его непрерывность во всей области определения. При построении аппроксимирующих функций используются симплексные координаты.

Симплекс S в n -мерном пространстве определяется как геометрическая фигура с $n+1$ вершинами. Одномерный симплекс — отрезок прямой, двумер-

ный симплекс — треугольник, трехмерный симплекс — тетраэдр. Произвольный симплекс однозначно определяется координатами его вершин.

Размер симплекса вычисляется по формуле:

$$\sigma(S) = \frac{1}{n!} \cdot \begin{vmatrix} 1 & x_1^{(1)} & x_1^{(2)} & x_1^{(n)} \\ 1 & x_2^{(1)} & x_2^{(2)} & x_2^{(n)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & x_{n+1}^{(1)} & x_{n+1}^{(2)} & x_{n+1}^{(n)} \end{vmatrix} \quad (2)$$

Элементами этого определителя являются координаты вершин симплекса. Нижние индексы определяют номера вершин, а верхние — номера ортогональных координат в n — мерном пространстве. Таким образом, размером отрезка является его длина, треугольника — его площадь, тетраэдра — его объем и т.д.

Симплекс S можно разделить на подсимплексы S_k , выбрав точку P внутри симплекса S , причем

$$\sigma(S) = \sum_{k=1}^{n+1} \sigma(S_k) \quad (3)$$

Для этого вводятся симплексные координаты точки P , инвариантные относительно переноса и поворота глобальной системы координат:

$$\xi_m = \frac{\sigma(S_m)}{\sigma(S)}, \quad m = \overline{1, n+1}. \quad (4)$$

Геометрический смысл симплексных координат — отношение длины перпендикуляра, опущенного из точки P на одну из граней симплекса, к длине опущенного на ту же грань перпендикуляра из вершины симплекса противоположной данной грани. Например, для двумерного случая отношение площадей треугольников PA_2A_3 и $A_1A_2A_3$ равно отношению их высот, так как оба треугольника имеют своим основанием отрезок A_2A_3 .

Из выражений (3) и (4) получим равенство:

$$\sum_{k=1}^{n+1} \xi_k = 1 \quad (5)$$

Пусть произвольный треугольник с вершинами в точках (x_1, y_1) , (x_2, y_2) , (x_3, y_3) размещен в плоскости OXY . Тогда первая симплексная координата точки (x, y) на основании (4) равна

$$\xi_1 = \frac{\begin{vmatrix} 1 & x & y \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{vmatrix}}. \quad (6)$$

Разлагая первый определитель по элементам первого столбца, получим:

$$\xi_1 = \frac{1}{2A} \left(\begin{vmatrix} x_2 & y_2 \\ x_3 & y_3 \end{vmatrix} - \begin{vmatrix} x & y \\ x_3 & y_3 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} x & y \\ x_2 & y_2 \end{vmatrix} \right), \quad (7)$$

где A — площадь треугольника $A_1A_2A_3$.

Вычисляя миноры, находим:

$$\xi = \frac{x_2y_3 - y_2x_3}{2A} + \frac{(y_2 - y_3)x}{2A} + \frac{(x_3 - x_2)y}{2A}. \quad (8)$$

Вычислив аналогичным образом две оставшиеся симплексные координаты ξ_2, ξ_3 , получим, что переход от глобальных декартовых координат (x, y) к локальным симплексным координатам (ξ_1, ξ_2, ξ_3) осуществляется с помощью преобразования:

$$2A \cdot \begin{bmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \\ \xi_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_2y_3 - x_3y_2 & y_2 - y_3 & x_3 - x_2 \\ x_3y_1 - x_1y_3 & y_3 - y_1 & x_1 - x_3 \\ x_1y_2 - x_2y_1 & y_1 - y_2 & x_2 - x_1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ x \\ y \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Для того чтобы определить интерполяционные функции на симплексах, введем семейство вспомогательных полиномов. Член этого семейства с номером m вычисляется по формуле:

$$R_m(n, \xi) = \prod_{k=0}^{m-1} \frac{\xi - k/n}{m/n - k/n} = \frac{1}{m!} \prod_{k=0}^{m-1} (n\xi - k), \quad m > 0, \quad (10)$$

$$R_0(n, \xi) = 1.$$

Этот полином имеет нули при $\xi = 0; \frac{1}{n}; \dots; \frac{m-1}{n}$ и принимает значение

равное единице при $\xi = \frac{m}{n}$.

На одномерном симплексе (отрезке заданной длины) интерполяционные функции определяются с помощью формулы:

$$\alpha_{ij} = R_i(n, \xi_1) \cdot R_j(n, \xi_2), \text{ где } i + j = n. \quad (11)$$

На двумерном симплексе (треугольнике) интерполяционные функции определяются выражением:

$$\alpha_{ijk} = R_i(n, \xi_1) \cdot R_j(n, \xi_2) \cdot R_k(n, \xi_3), \text{ где } i + j + k = n. \quad (12)$$

Каждая из этих интерполяционных функций обращается в нуль во всех узловых точках, за исключением связанного с ней узла, где она принимает значение равно единице. Следовательно, данные функции представляют собой полиномы Лагранжа, записанные в нестандартном виде.

Рассматриваемые интерполяционные функции обладают следующими важными для построения конечных элементов свойствами. Интерполяционные функции определяются через симплексные координаты и, следовательно, инвариантны при поворотах и переносах глобальной системы координат. Кроме того, симплексные координаты удобны с вычислительной точки зрения, так как охватывают одинаковый диапазон значений для любого симплекса.

УДК 539.21

ГРАНИЧНЫЕ УСЛОВИЯ ДЛЯ УРАВНЕНИЙ ГИНЗБУРГА-ЛАНДАУ И ОБРАЗОВАНИЕ ВИХРЕВОЙ РЕШЕТКИ В МНОГОСЛОЙНЫХ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ НАНОСТРУКТУРАХ

Кушнир В. Н.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

Повышенный интерес к исследованию сверхпроводящих многослойных наноструктур (СМНС) обусловлен следующими причинами: Во-первых, ряд интересных физических свойств [1], а также, относительно простая технология формирования СМНС позволяют их использовать как для изучения фундаментальных проблем теории сверхпроводимости, так и в практических приложениях. Во-вторых, свойства системы магнитных вихрей, образующихся в промежуточном состоянии в СМНС, во многом подобны свойствам вихревой среды в высокотемпературных сверхпроводниках (ВТСП). Поэтому СМНС

являются удобным объектом для моделирования процессов, происходящих в вихревой среде. Изучение вихревых процессов в сверхпроводниках важно, в частности, с точки зрения повышения их токонесущей способности.

В данной работе исследуется сверхпроводящее состояние СМНС типа сверхпроводник/нормальный металл, находящихся во внешнем магнитном поле, величина H_0 которого близка к верхнему критическому значению $H_{c2}(T)$. Описание сверхпроводящего состояния проводится в рамках феноменологической теории Гинзбурга-Ландау (ГЛ) [2], использование которой, в том числе и в данном случае, экспериментально обоснованно. Применение теории ГЛ предполагает решение вариационной задачи для функционала ГЛ, который в нашем случае можно записать следующим образом:

$$G = \int d^2r \left\{ |(\nabla - iA)\Psi(r)|^2 - \eta(z)|\Psi(r)|^2 + \frac{1}{2}|\Psi(r)|^4 + \kappa^2 \cdot H^2(r) \right\} \quad (1)$$

Здесь использованы следующие обозначения: G – линейная плотность (по y) функционала ГЛ; $A(r)$ — вектор-потенциал магнитного поля $H(r)$; $\Psi(r)$ — волновая функция (ВФ) конденсата сверхпроводящих пар; κ — параметр ГЛ (в нашем случае $\kappa > 1$), $h(z)$ – ступенчатая функция, определенная соотношением

$$\eta(z) = \begin{cases} 1, & z \in \Omega_S \\ -\xi_S^2(T)/\xi_N^2(T), & z \in \Omega_N \end{cases} \quad (2)$$

где $\xi_S(T)$, $\xi_N(T)$ — «корреляционные длины», характеризующие быстроту изменения ВФ внутри сверхпроводящего и нормального слоев, T — температура, Ω_S , Ω_N — области, занятые сверхпроводящими и нормальными слоями, соответственно. При этом мы выбрали следующую систему координат: ось OZ направлена перпендикулярно поверхности слоев, координатная плоскость $ХОУ$ параллельна поверхностям слоев и совпадает с плоскостью симметрии структуры, внешнее магнитное поле направлено вдоль оси OY . СМНС полагается бесконечной в направлениях OX и OY .

Варьирование функционала (1) приводит к следующей системе уравнений для $\Psi(r)$ и $A(r)$:

$$\begin{cases} (\nabla - iA(r))^2 \Psi(r) + \eta(z)\Psi(r) - |\Psi(r)|^2 \Psi(r) = 0 \\ \nabla \times H(r) = -\frac{i}{2\kappa^2} (\Psi^*(r)\nabla\Psi(r) - \Psi(r)\nabla\Psi^*(r)) - A(r)|\Psi(r)|^2 \end{cases} \quad (3)$$

Данная система дополняется граничными условиями

$$(\partial_z - iA_z)\Psi(r)|_{z=\pm L/2} = 0, \quad (4)$$

$$H(r)|_{z=\pm L/2} = (0, H_0, 0), \quad (5)$$

а также условиями сшивания ВФ на границах между сверхпроводящими и нормальными слоями.

Заметим, что в подавляющем большинстве работ [1,3] вместо (5) используются граничные условия $Y(z \rightarrow \pm \infty) = 0$, что соответствует приближению бесконечной сверхрешетки

В окрестности $H_{c2}(T)$ $Y(r) \rightarrow 0$, так что нелинейными членами в (3) в нулевом порядке теории возмущений (ТВ) можно пренебречь. В результате, для магнитного поля и вектор-потенциала имеем

$$H^{(0)}(r) = (0, H_0, 0) \quad (6)$$

$$A^{(0)}(r) = (H_0 z, 0, 0) \quad (7)$$

ВФ ищем в виде $Y(r) = e^{ikx} y(z)$, где $y(z)$ определяется уравнением

$$\left(\partial_z^2 + \eta(z) - H_0^2(z - z_0)^2\right) \psi(z) = 0 \quad (8)$$

Здесь параметр $z_0 \equiv k/H_0$.

Уравнение (8) вместе с граничными условиями (4) представляет собой задачу на собственные значения для H_0 при каждом фиксированном z_0 . Вычисления проводились следующим образом. Для каждого заданного значения параметра z_0 находилось наибольшее собственное значение $H_0(z_0)$. Максимум $H_0(z_0)$ есть верхнее критическое поле H_{c2} . При этом при низких температурах верхнему критическому полю соответствует набор значений параметра z_0 в количестве, равном числу N_b би-слоев наноструктуры. Иначе говоря, при низких температурах собственное значение $H_{c2} N_b$ — кратно вырождено. При промежуточных температурах (достаточно близких к критической T_c) собственное значение H_{c2} вырождено двукратно — легко видеть, что одному и тому же H_{c2} соответствуют ВФ $e^{ikx} y(z)$ и $e^{-ikx} \psi(-z)$. При этом ВФ (всюду положительно определенная) оказывается «локализованной» у одного из краев наноструктуры. Данный факт имеет место лишь для конечной СМНС (до сих пор в литературе рассматривалось лишь приближение беско-

нечной сверхрешетки) и оказывается существенным при исследовании сверхпроводника в магнитном поле, близком к верхнему критическому. Известно [4], что при понижении величины магнитного поля от критического в сверхпроводнике образуется решетка вихрей магнитного потока. В нашем случае это происходит при низких температурах, когда имеется N_b — кратное вырождение критического значения H_{c2} . При промежуточных температурах имеет место иная ситуация. Рассмотрим этот случай подробнее. Для исследования окрестности критического состояния необходимо учесть первый порядок ТВ по $|\Psi(\mathbf{r})|^2$. Очевидно, при расчете ВФ первого приближения, в силу двукратного вырождения, в качестве исходного (нулевого) приближения для ВФ конденсата следует взять

$$\Psi^{(0)}(\mathbf{r}) = c_1 e^{i\mathbf{k}\mathbf{r}} \psi(z) + c_2 e^{-i\mathbf{k}\mathbf{r}} \psi(-z) \quad (9)$$

с неизвестными коэффициентами c_1, c_2 .

Тогда для поправки $\Psi^{(1)}(\mathbf{r})$ к ВФ получим уравнение

$$(\nabla - i\mathbf{A}^{(0)})^2 \Psi^{(1)}(\mathbf{r}) + \eta(z)\Psi^{(1)}(\mathbf{r}) = 2iA^{(1)}(\nabla - i\mathbf{A}^{(0)})\Psi^{(0)}(\mathbf{r}) + |\Psi^{(0)}(\mathbf{r})|^2 \Psi^{(0)}(\mathbf{r}) \quad (10)$$

Условие ортогональности $\Psi^{(0)}(\mathbf{r})$ и $\Psi^{(1)}(\mathbf{r})$ влечет следующее интегральное соотношение

$$\int d\mathbf{r} \left\{ \Psi^{(0)*}(\mathbf{r}) \cdot 2iA^{(1)}(\nabla - i\mathbf{A}^{(0)})\Psi^{(0)}(\mathbf{r}) + |\Psi^{(0)}(\mathbf{r})|^4 \right\} = 0 \quad (11)$$

где $A^{(1)}(\mathbf{r})$ — поправка первого приближения для вектор-потенциала магнитного поля, которую мы не станем выписывать.

Процедура минимизации функционала (1) с использованием (11) приводят к вполне ожидаемому соотношению $c_1 = c_2$ для весовых коэффициентов ВФ (9). Отсюда следует, что ВФ (9) имеет вдоль оси ОХ цепочку нулей с периодом $\Delta x = \pi/2k$. Это означает, что в плоскости симметрии наноструктуры (ХОУ) образуется цепочка вихрей магнитного потока — 1-мерная, а не 2-мерная решетка, как при низких температурах. Данная цепочка вихрей не обладает свойствами устойчивости обычной двумерной вихревой решетки по отношению к внешним возмущениям. Именно, при возмущении сверхпроводящего состояния транспортным током, необходимым для наблюдения резистивной характеристики (он пропускается вдоль направления ОХ), на вихри действует сила Лоренца в направлении оси ОZ. Кроме того, вихри находятся в поле т.н. сил пиннинга, создаваемом неоднородной (периодической) структурой сверхпроводника. Результат совместного действия сил пин-

нинга и силы Лоренца на вихревую цепочку оказывается различным в зависимости от типа симметрии многослойной структуры. Для многослойной структуры N-типа (плоскость симметрии находится в нормальном слое) цепочка вихрей находится посередине нормального слоя, и сила пиннинга препятствует проникновению вихрей в сверхпроводящий слой. Так как транспортный ток протекает по сверхпроводящим слоям (рассматривается окрестность критического поля), то он практически не испытывает потерь, поскольку не пересекается с вихрями центрального нормального слоя. Следовательно, будем наблюдать в этом случае резкий спад резистивной характеристики. Симметричное состояние (9) при этом устойчиво. Если же плоскость симметрии находится в сверхпроводящем слое (многослойные структуры S-типа), то вихри, находящиеся в ней, будут препятствовать прохождению транспортного тока. Следовательно, за счет центрального слоя будет иметь место не полное подавление сопротивления в сверхпроводнике. Разрушение сверхпроводящего состояния в центральном слое наноструктуры, либо, в альтернативном случае, перераспределение плотности проходящего через сверхпроводник тока означает неустойчивость состояния с ВФ (9) для структур S-типа: сверхпроводящая фаза в силу условий на границах между S — и N-слоями «выдавливается» к краям сверхпроводника. Следовательно, энергетически выгодным может оказаться в этом случае состояние, соответствующее меньшим значениям верхнего критического поля. И в том, и в другом случае переход в сверхпроводящее состояние затягивается.

Литература:

1. Jin B. Y. and Ketterson J. B., *Advances in Phys.*, 1989, 38, №. 3, pp.189.
2. Гинзбург В.Л., Ландау Л.Д., *ЖЭТФ*, 1950, 10, с. 1064.
3. Луков А.Н., *Advances in Phys.*, 1993, v. 42, p. 263.
4. Абрикосов А.А., *Основы теории металлов*, М., Наука, 1987.

УДК 539.16

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГРАНИТА МЕСТОРОЖДЕНИЯ «МИКАШЕВИЧИ»

Березовский Н.И., Кужир П.Г., Попко С.В., Дубина М.М.
Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

Около 2/3 дозы от всех источников радиации человек получает от природных источников. Население развитых стран большую часть времени проводит внутри помещений и поэтому важно знать дозы, формируемые естественными радионуклидами, содержащимися в строительных материалах. К этой проблеме тесно примыкают вопросы облучения людей радиоактивным газом радоном [1]. Радоновая проблема остро встала в 70-е годы прошлого века, когда внутри зданий в Швеции и Финляндии в воздухе помещений были обнаружены концентрации радона в 500 раз превышающие типичные значения в наружном воздухе.

В последние годы большое внимания уделяется изучению способов снижения уровней облучения населения. Эти вопросы крайне важны с точки зрения разработки стратегии средств защиты от вредного воздействия радиации. Предотвращение повышенного облучения населения во вновь строящихся или эксплуатируемых зданиях обусловлено нормированием содержания естественных радионуклидов в строительных материалах. Вопросы выбора участка застройки, его геологическое строение, вентиляция помещений важны для снижения облучения, обусловленного радоном. Поэтому особое значение имеет поиск экономически оправданных решений, направленных на снижение концентрации радона и дочерних продуктов его распада в воздухе помещений.

Все живое на Земле подвергается непрерывному облучению от различных источников естественного и искусственного происхождения, которые образуют радиационный фон.

Радиационный фон Земли состоит из естественного или природного, технологически измененного естественного радиационного фона и искусственного радиационного фона.

Естественный радиационный фон (ЕРФ) формирует ионизирующее излучение от природных источников космического и земного происхождения. Ионизирующее излучение от природных источников, которые являются результатом деятельности человека, носит название технологически измененного естественного радиационного фона (ТИЕРФ).

Добыча полезных ископаемых, таких как строительный камень, калийные удобрения, использование строительных материалов, содержащих естественные радионуклиды, продукты сгорания органического топлива – вот неполный перечень фактов, формирующих ТИЕРФ. Основную дозу равную 2 мЗв, человек получает от естественных источников радиации.

Второй составляющей ЕРФ являются естественные радионуклиды, содержащиеся в земной коре: это в основном ^{40}K , ^{87}Rb и члены радиоактивных семейств ^{238}U , ^{232}Th . Содержание естественных радионуклидов в различных участках земной коры неодинаково. Самое большое количество радионуклидов содержится в горных породах.

Наиболее высокие удельные активности естественных радионуклидов имеют породы вулканического происхождения: гранит, диорит, туф, пемза; наиболее низкие – для карбонатных пород (таких как мрамор, известняк). Строительные материалы такие, как песок и гравий имеют удельную активность естественных радионуклидов, которая близка к средним значениям ее для почв. Для глины диапазон удельной активности естественных радионуклидов колеблется в пределах 10 + 110 Бк/кг для ^{226}Ra , 30 + 110 Бк/кг для ^{228}Th и 518 + 1220 Бк/кг для ^{40}K [2].

Дополнительным источником облучения человека являются строительные материалы. Исследования радиоактивности строительных материалов проводились достаточно широко в зарубежных странах. Средняя удельная активность гранитов равна 90, 80, 650 Бк/кг соответственно для Ra — 226, Th — 228, K — 40.

Облучение людей регламентировано у нас в Республике «Нормами радиационной безопасности» (НРБ-2000) [3]. С целью нормирования облучения населения от природных радионуклидов в строительных материалах вводят эффективную удельную активность $A_{эфф}$, которая определяется следующим образом:

$$A_{эфф} = A_{\text{Ra}} + 1,3A_{\text{Th}} + 0,09A_{\text{K}}$$

где A_{Ra} и A_{Th} — удельная активность радионуклидов ^{226}Ra и ^{232}Th , находящихся в равновесии с остальными членами уранового и ториевого рядов; A_{K} — удельная активность ^{40}K . Все удельные активности берут в Бк/кг. НРБ-2000 регламентирует $A_{эфф}$ следующим образом:

- $A_{эфф} < 370$ Бк/кг для материалов в строящихся и реконструируемых жилых и общественных зданиях (I класс);
- $A_{эфф} \leq 740$ Бк/кг для материалов, используемых в дорожном строительстве в пределах территории населенных пунктов и зон перспективной застройки, а также при возведении производственных сооружений (II класс);

- $A_{эфф} \leq 1350$ Бк/кг для материалов, используемых в дорожном строительстве вне населенных пунктов (III класс);
- При $1350 \text{ Бк/кг} < A_{эфф} < 4000$ Бк/кг (IV класс) использование материалов разрешается лишь по согласованию с республиканским органом санитарно-эпидемиологической службы Минздрава Здравоохранения Республики Беларусь;
- При $A_{эфф} > 4000$ Бк/кг материалы не используются в строительстве.

Наибольшие $A_{эфф}$ характерны для красного кирпича, керамзита, глины, гранитного щебня, наиболее низкие $A_{эфф}$ — для извести.

При производстве строительных изделий в качестве заменителя бетона часто используются отходы промышленности.

Зола и шлак из ТЭЦ имеют повышенную удельную активность по сравнению со средним значением для стройматериалов, но она обычно укладывается в диапазон удельной активности для отечественных стройматериалов. Месторождение «Микашевичи» является основным поставщиком строительного материала в Беларуси. Ежегодно добывается более 1 млн. м³ камня. Основными кристаллическими породами месторождения являются диориты, граниты и гранодиориты. Извлекаемые породы обладают средней механической прочностью.

Разработка месторождения осуществляется открытым способом с помощью взрыва. Одним из основных взрывчатых веществ (ВВ) является граммонит — гранулированное водоустойчивое промышленное ВВ I класса, гранулы аммиачной селитры которых покрыты водозащитной оболочкой из тротила. Сухие граммониты пылят, при низкой влажности воздуха и электризуются при зарядении скважин и пневмотранспортировании. Тротиловая пыль вредна для здоровья и взрывоопасна в аэрозольном состоянии. Поэтому, как показали исследования, следует обязательно пользоваться индивидуальными средствами защиты и обязательно применять подводящие провода с большим удельным сопротивлением порядка 10^4 Ом·м. Кроме этого, необходимо ограничить скорость пневмотранспортирования, она не должна превышать 25 м/с. Для уменьшения пылеобразования и электролизаии следует в загружаемое ВВ впрыснуть 3–5% воды, а в зимнее время (при температуре до -15°C) столько же аммиачной селитры 43% концентрации. Если температура окружающего воздуха колеблется в пределах $-15^\circ\text{C} + 30^\circ\text{C}$, то надо впрыснуть в ВВ до 5% кальциевой селитры 43% концентрации.

Нами была исследована удельная активность гранитов месторождения «Микашевичи». Исследования проводились на сцинтилляционном гамма-спектрометре МКГ-АТ 1321 с 512 каналами измерения. Данные исследования представлены в таблице 1.

**Удельная активность гранита в образцах
для месторождения «Микашевичи»**

Радионуклид	Удельная активность, Бк/кг
K – 40	698,9
Ra – 226	16,05
Th – 232	26,07
A _{эфф}	109,6

Таким образом, граниты, добываемые на месторождении «Микашевичи», могут быть использованы в качестве строительных материалов для строящихся и реконструируемых жилых и общественных зданий.

Литература:

1. Крисюк Э.М. Радиационный фон помещений. М. Энергоатомиздат, 1989, с. 120
2. Лобач Д.И., Тушин Н.Н. Радон. Мн. 1997, с. 110
3. Нормы радиационной безопасности (НРБ — 2000). Мн., 2000, с. 115.

УДК 535.3

**РАСЧЕТ ФОТОННОЙ ЗАПРЕЩЕННОЙ ЗОНЫ ДЛЯ КРИСТАЛЛА
ИЗ СФЕРИЧЕСКИХ КЛАСТЕРОВ**

Бобученко Д.С.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

В настоящее время существует все возрастающий интерес к изучению распространения электромагнитных волн в упорядоченных и неупорядоченных периодических диэлектрических структурах. Этот интерес обусловлен существованием частотных интервалов (фотонных запрещенных зон) в оптическом диапазоне, и электромагнитные волны с частотами, лежащими в этих интервалах, распространяться в таких структурах не могут, аналогично как в случае распространения электронных волн в кристаллах. Потенциальные приложения этого явления обширны. Это в первую очередь создание

микро волноводов в оптическом диапазоне, резонаторов и полостей в таких кристаллах для высокоэффективных излучательных структур. Кроме того, многие исследователи надеются, что это явление может послужить основой для создания принципиально новой элементной базы для оптоэлектронных приборов.

В настоящее время происходит интенсивный поиск и исследование материалов, в которых может быть обнаружены фотонные запрещенные зоны. К числу перспективных материалов относится опал. Материал обладает кристаллической структурой, в узлах которой находятся сферические кластеры с размерами 100-300 нм. Освоена технология получения искусственных опалов с требуемыми размерами сфер. Кристалл опала имеет 26% пустоты, которую можно заполнить полупроводниковым материалом (кремнием, германием и другими). Получают также инвертированные структуры, удалением исходных сферических кластеров SiO_2 , на месте которых остаются воздушные сферы в диэлектрическом материале.

По-прежнему является актуальной задача поиска трехмерных периодических диэлектрических структур, в которых может быть обнаружена полная фотонная запрещенная зона. Поэтому важно, с теоретической стороны, иметь точную математическую модель и соответствующие алгоритмы, с помощью которых можно было бы проводить детальные расчеты для произвольных периодических структур.

Существуют несколько математических методов расчета фотонных зонных структур. Одним из них, позволяющим рассчитывать трехмерные структуры без больших затрат машинного времени является метод плоских волн (PWEM). В основе его, как любых других, лежат уравнения Максвелла. Для электромагнитных волн распространяющихся в среде с пространственно периодически изменяющейся диэлектрической функцией $\epsilon(\mathbf{r})$ уравнения Максвелла могут быть записаны как

$$\nabla \times \mathbf{E} = i(\omega / c)\mathbf{H}; \quad \nabla \times \mathbf{H} = -i(\omega / c)\epsilon(\mathbf{r})\mathbf{E} \quad (1)$$

которые можно привести к следующему виду для магнитного поля:

$$\nabla \times \left[\frac{1}{\epsilon(\mathbf{r})} \nabla \times \mathbf{H} \right] = \frac{\omega^2}{c^2} \mathbf{H} \quad (2)$$

Так как $\epsilon(\mathbf{r})$ является периодической, можно использовать теорему Блоха и разложить магнитное поле \mathbf{H} в ряд по плоским волнам:

$$\vec{\mathbf{H}}(\mathbf{r}) = \sum_G \sum_{\lambda=1}^2 h_{G,\lambda} \vec{e}_\lambda e^{i(\mathbf{k}+\mathbf{G})\mathbf{r}} \quad (3)$$

где k — волновой вектор в зоне Бриллюэна решетки, G — вектор обратной решетки, e_1, e_2 — единичные вектора перпендикулярные к $k+G$, образуют триаду из-за поперечной природы H ($\nabla H = 0$).

Подставляя (3) в (2) получим следующие матричные уравнения:

$$\sum_{GG'} H_{GG'}^{\lambda\lambda'} h_{G\lambda'} = \left(\frac{\omega}{c}\right)^2 h_{G\lambda} \quad (4)$$

где

$$h_{GG'} = |k + G| |k + G'| \epsilon_{GG'}^{-1} \begin{bmatrix} e_2 e_2 & -e_2 e_1 \\ -e_1 e_2 & e_1 e_1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

и $\epsilon_{G-G'} = \epsilon(G-G')$ есть коэффициенты Фурье диэлектрической функции.

Для сфер радиуса R с диэлектрической функцией ϵ_a , образующих границиентрированную кубическую решетку Браве, в однородной среде с диэлектрической функцией ϵ_b , вектор прямой решетки:

$$\vec{r} = l_1 \vec{a}_1 + l_2 \vec{a}_2 + l_3 \vec{a}_3; \quad l_1, l_2, l_3 = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (6)$$

$$\vec{a}_1 = \frac{a_0}{2}(0, 1, 1); \quad \vec{a}_2 = \frac{a_0}{2}(1, 0, 1); \quad \vec{a}_3 = \frac{a_0}{2}(1, 1, 0)$$

Вектор обратной решетки:

$$\vec{G} = h_1 \vec{b}_1 + h_2 \vec{b}_2 + h_3 \vec{b}_3; \quad h_1, h_2, h_3 = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (7)$$

$$\vec{b}_1 = \frac{2\pi}{a_0}(-1, 1, 1); \quad \vec{b}_2 = \frac{2\pi}{a_0}(1, -1, 1); \quad \vec{b}_3 = \frac{2\pi}{a_0}(1, 1, -1)$$

Объем элементарной ячейки — $a_0^3/4$, степень упаковки $f = 16\pi R^3/(3a_0^3)$.

В методе плоских волн используют коэффициенты Фурье:

$$\epsilon_G = \frac{1}{\Omega} \int d\vec{r} e^{-iGr} \epsilon(r)$$

где Ω — объем элементарной ячейки.

Для неперекрывающихся сфер можно использовать аналитическую формулу для коэффициентов Фурье, которая справедлива для $f \leq 0.74$

$$\epsilon_G = \begin{cases} 1 - f(1 - \frac{\epsilon_a}{\epsilon_b}) \\ -f(1 - \frac{\epsilon_a}{\epsilon_b}) \frac{3(\sin GR - GR \cos GR)}{(GR)^3} \end{cases} \quad (8)$$

Уравнения (4),(5),(6),(7),(8) решались численно с использованием стандартных методов матричной диагонализации. Размер матрицы $-2N*2N$, N — число точек в обратной решетке. Результаты представленные в данной работе были получены при $N = 670$, что позволяет получить точность менее 1% для десяти нижних зон.

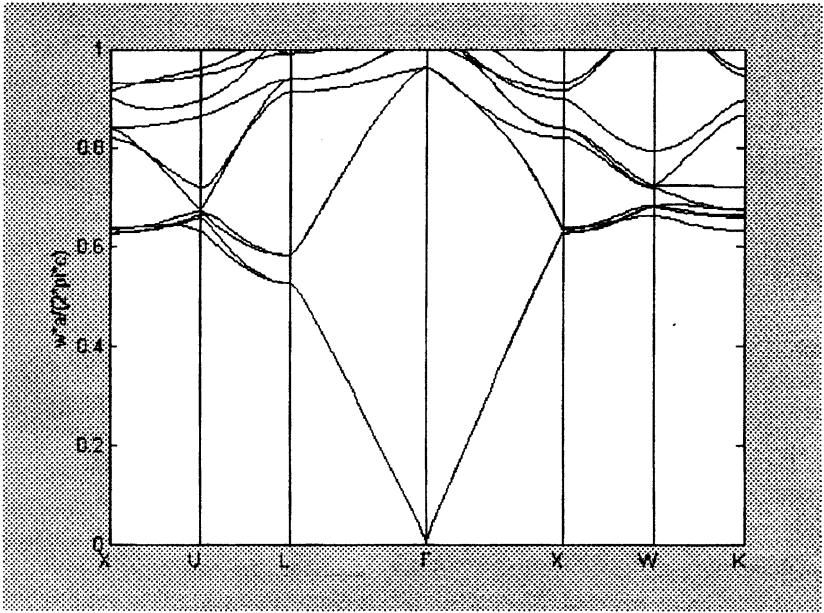


Рис. 1. Рассчитанная фотонная зонная структура вдоль важнейших линий симметрии в зоне Бриллюэна для г.ц.к. решетки, состоящей из воздушных сфер $\epsilon_s=1$ в диэлектрической среде $\epsilon_b=11,9$ (кремний). Степень упаковки $f=74\%$ воздуха, 26% диэлектрического материала, $a_0=0,5$ мкм.

Выполнены численные расчеты для гранцентрированной кубической решетки (г.ц.к.) Браве для различных значений диэлектрической функции ϵ_s сфер и среды ϵ_b . На рис. 1 представлены результаты расчета зонной структуры для $a_0=0,5$ мкм, $f=0,74$, $\epsilon_s=1$, $\epsilon_b=11,9$.; на рис. 2 — $f=0,26$. Не для одной из г.ц.к. не обнаружено существование полностью запрещенной фотонной зоны. Однако, как показал расчет плотности состояний, зависимость плотности состояний от частоты является сложной, особенно для $f=0,26$. В нескольких областях существует резкое уменьшение плотности состояний, что может проявляться на эксперименте как запрещенная зона.

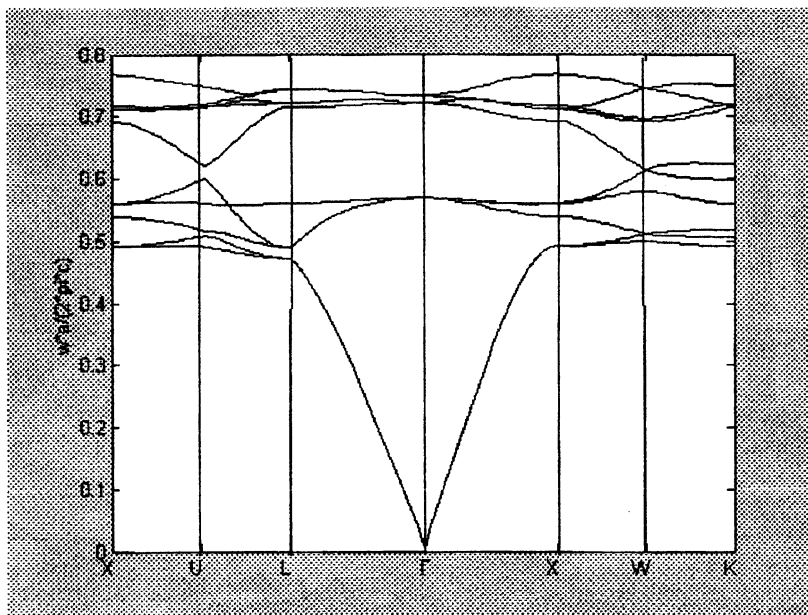


Рис. 2. Рассчитанная фотонная зонная структура вдоль важнейших линий симметрии в зоне Бриллюэна для г.ц.к. решетки, состоящей из воздушных сфер $\epsilon_a=1$ в диэлектрической среде $\epsilon_b=11,9$ (кремний). Степень упаковки $f=26\%$ воздуха, 74% диэлектрического материала, $a_0=0,5$ мкм.

Необходим дальнейший поиск структур, в которых могут существовать полностью запрещенные фотонные зоны для всех направлений.

Литература:

1. Busch K., John S. Phys. Rev. E 58, 3896 (1998).
2. Ho K.M., Chah C.T., Soukoulis C.M. Phys. Rev. Lett. 65, 3152 (1990).
3. Leung K.M., Liu Y.F. Phys. Rev. Lett. 65, 2646 (1990).
4. Hama J., Watanabe M., Kato T. J. Phys.: Condens. Matter. 2, 7445 (1990).

УДК 621.315.592

**ВЛИЯНИЕ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЙ И ТЕМПЕРАТУР
НА ГЕКСАГОНАЛЬНЫЙ НИТРИД ГАЛЛИЯ**

Дудяк А.И., Доманевский Д.С., Гобш Г., Новиков В.П., Жоховец С.В.
Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

Исследовалась возможность получения фазовых переходов гексагонального нитрида галлия (α -GaN) в кубическую модификацию (β -GaN) под воздействием высоких давлений и температур. Использовались методика и аппаратура, применяемые для синтеза и получения промышленных кристаллов алмаза и нитрида бора. Предельные давления и температуры могли достигать 70 кБар и 1500°C. Исходный α -GaN был получен высокотемпературным синтезом (700–1200°C) при взаимодействии газообразного аммиака с расплавом галлия. С целью создания благоприятных условий для образования и роста зародышей новой фазы к мелкокристаллическому α -GaN добавлялись некоторые металлы-катализаторы (Li, Ag, In, Al).

Рентгенограммы исходного α -GaN содержали стандартные для этого материала пики, хотя в более низкотемпературном (~800°C) материале желтого цвета (тип 1, рис. 1а) они были более широкими по сравнению с высокотемпературным (~1100°C) материалом (тип 2, рис. 1б), имевшим темный цвет. Уширение рентгеновских пиков обычно связывают с присутствием достаточно больших концентраций дефектов структуры и большим отклонением от равновесного состояния. В спектрах фотолюминесценции (рис. 2), наблюдавшихся только в материалах типа 2, при $T=80\text{K}$ обнаружены полосы с максимумами 3,45 эВ (А), 2,7 эВ (В) и 2,2 эВ (С). Их можно связать с экситонно-примесной (А), донорно-акцепторной (В) и примесно-дефектной (С) рекомбинацией.

Было проведено несколько серий экспериментов по синтезу β -GaN с целью качественной оценки рабочих давлений и температур. Образование β -GaN было обнаружено рентгенографическими исследованиями (рис. 1в) при использовании α -GaN типа 1 при давлениях 50кБар, и температурах около 1200°C в присутствии Li_3N катализатора. В более высокотемпературном α -GaN (тип 2) фазовые превращения наблюдались в присутствии катализатора AgLi при давлениях 50 кБар и температурах около 1000°C. Анализ рентгенограмм показал, что после обработки при высоких давлениях наблюдаются новые пики, которые можно объяснить образованием кристаллов кубической сингонии со структурой типа Si_2O . Параметр кристаллической решетки составил $a=4,935\text{Å}$. В спектрах фотолюминесценции (рис. 3) при 295K на

блюдается широкая полоса с максимумом в области 3,2 эВ, которая с понижением температуры до 80К смещается в область 3,05 эВ. Это может быть следствием термического выброса электронов с донорных состояний, ответственных за полосу В.

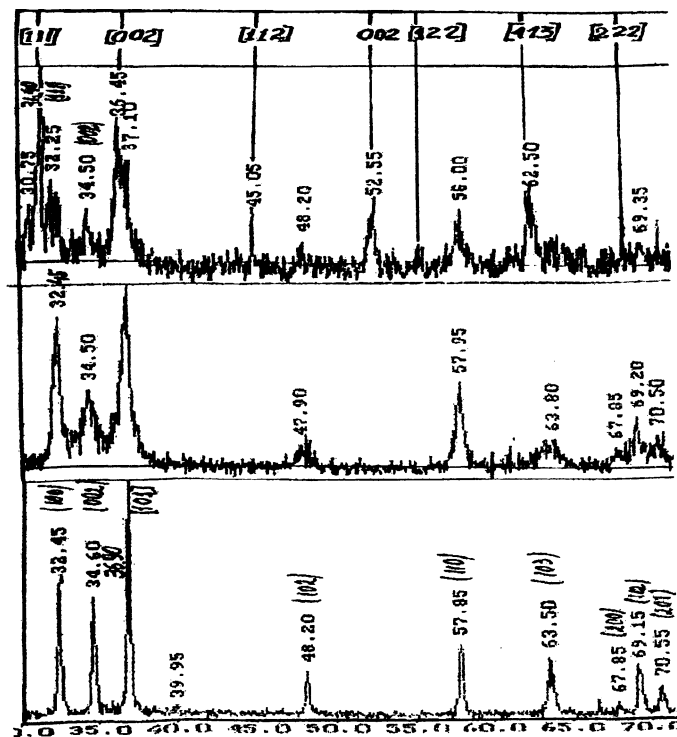


Рис. 1. Рентгенограммы GaN гексагональной (а – тип 1, б – тип 2) и кубической модификации (в)

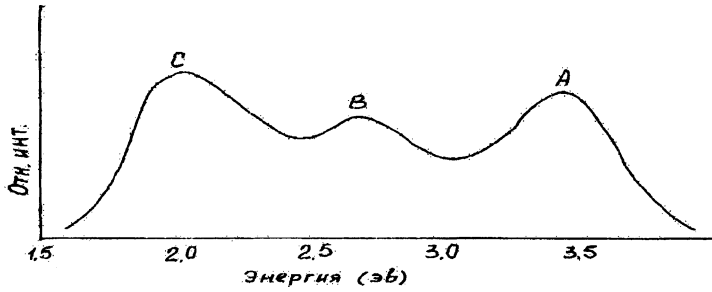


Рис. 2. Спектр фотолюминесценции гексагонального GaN

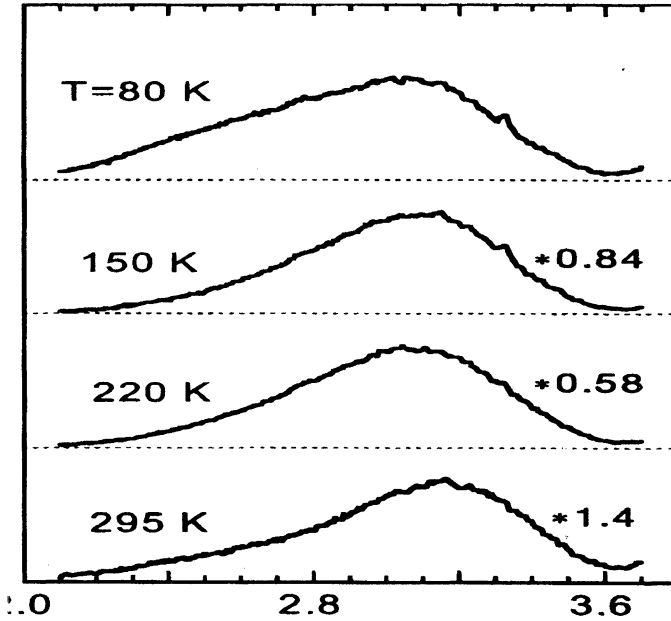


Рис. 3. Спектры фотолюминесценции кубического GaN

УДК 621.315

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОЛИТНО-РАЗРЯДНОЙ ПОЛИРОВКИ В ВОДНЫХ РАСТВОРАХ СОЛЕЙ АММОНИЯ

Степаненко А.В., Паршуту А.Э., Доманевский Д.С., Кособуцкий А. А.
Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

1. Общая характеристика процесса

Процесс электролитно-разрядной обработки (ЭРОМ) материалов осуществляется в электролитической ванне с активным металлическим электродом (анодом или катодом), погружаемым в низкоконцентрированные водные растворы (2–6%) различных солей аммония.

Обобщенная вольтамперная характеристика ЭРОМ в анодном процессе представлена на рис. 1.

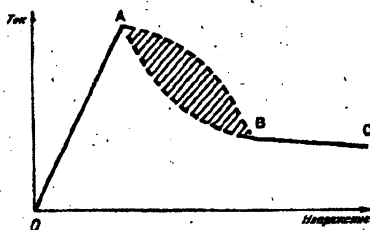


Рис. 1.

Она состоит из трех участков. Первый участок ОА, характеризующийся линейным ростом тока, соответствует обычному электролизу, который подчиняется закону Ома. Он сопровождается газовыделением на электродах (водород и кислород) и переносом ионов металлического анода в электролит.

При увеличении напряжения на электродах до 60–70 В начинает возникать слабое люминесцентное свечение анода, сопровождаемое высоко- и низкочастотными колебаниями напряжения и тока. При плотностях тока, превышающих $\sim 5,5$ А/см² возникает так называемый коммутационный режим (нисходящая ветвь ВАХ-АВ), который характеризуется периодическим образованием парогазовой оболочки (ПГО), охватывающей поверхность электрода с меньшей площадью. Эти явления также связывают [1] с локальными электрическими пробоями оксидной пленки, обладающей односторонней проводимостью в направлении к катоду.

ду. Возникновение микроразрядов сопровождается выделением тепла за счет химических реакций окисливания и джоулева падения напряжения на окисной пленке. Поскольку сопротивление металлического анода и слоя электролита меньше чем сопротивление контакта металл-пленка-электролит, то наибольшая тепловая энергия выделяется на контакте. Время взрывного расширения ПГО составляет около 10^{-4} с, так что она быстро размывает поверхность анода и основной объем электролита, вызывая резкий спад тока и возникновение импульса напряжения с амплитудой до 1000 В. В это время в оболочке наблюдается газовый разряд, вызывающий яркое красноватое свечение всей прианодной области. После взрыва изолирующая оболочка схлопывается и процесс повторяется снова с частотой 100–120 Гц.

Рабочий режим процесса ЭРОМ, соответствующий третьему участку ВАХ (горизонтальная сплошная ветвь — ВС) на рис. 1, можно получить при быстром повышении напряжения свыше 100 В в область 360–380 В и использовании низкоконцентрированных электролитов. При этом реализуется так называемый электрогидродинамический режим ЭРОМ (ЭГДР). Он отличается от режима нагрева анода, при котором устойчивая толщина ПГО составляет $<0,1$ мм. При переходе в ЭГДР возрастает интенсивность люминесценции электрических разрядов, парогазовая оболочка увеличивает толщину до 0,2–0,4 мм, обнаруживаются волнообразные перемещения жидкости относительно анода, распыление электролита, сопровождаемое забросом его капель на анод. Имеет место интенсивное перемешивание электролита, способствующее выравниванию температуры анода и электролита в области 80–90°C. На осциллограммах наблюдаются высоко и низкочастотные импульсы тока, связываемые с существованием специфических коронных и искровых разрядов в парогазовой оболочке. Вместе с тем, статическое сопротивление разрядного промежутка возрастает в 2–2,5 раза, плотность тока снижается до 0,2–0,6 А/см²

Исследования, проведенные в работе [2], показали, что амплитуды и частоты повторения выбросов напряжения и тока можно существенно уменьшить путем шунтирования разрядного промежутка сопротивлением или емкостью, подбором состава и температуры электролита, а также оптимизацией конструкции электролитной ванны и режимов повышения напряжения на её электродах. Все эти способы позволяют реализовать на практике различные типы электролитно-разрядной обработки: обезжиривание, очистку, травление, полировку, термообработку и легирование поверхности, пайку и сварку различных материалов.

2. Результаты эксперимента и их обсуждение

В настоящей работе приводятся результаты исследования и оптимизации условий и режимов электролитно-разрядной полировки нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т в электролитах на основе $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, NH_4NO_3 и NH_4Cl . Выбор электролитов этого типа связан с необходимостью обеспечения экологической безопасности технологических процессов ЭРОМ и достаточной легкостью образования ПГО в этих растворах.

Образование ПГО обусловлено существенной разницей в площадях обрабатываемой детали и стенок ванны, а, следовательно, и плотностью тока на этих поверхностях. При дальнейшем повышении напряжения у поверхности детали, имеющей меньшую площадь, удельная плотность мощности достаточна для локального пленочного вскипания электролита и образования у поверхности детали стабильной парогазовой оболочки. Сформировавшаяся таким образом оболочка из пара и газа отжимает электролит от поверхности детали и значительно увеличивает электрическое сопротивление в цепи деталь-электролит. При этом сила тока резко уменьшается, и напряжение источника питания почти полностью прикладывается к образовавшейся парогазовой оболочке. Из-за высокой локальной напряженности электрического поля возникает частичная ионизация газа с протеканием электрического тока через парогазовую оболочку в виде импульсных и диффузионных электрических разрядов. Возникает новая активная среда, оказывающая эффективное воздействие на материал поверхности детали.

Таким образом, создаются условия для реализации неоднородного распределения напряженности электрического поля, возможности локальных перегревов и кинетических воздействий. Поскольку наибольшая вероятность электрических разрядов через парогазовую оболочку существует между микровыступами обрабатываемой поверхности и гребнями волны электролита, то удаление материала происходит, по-видимому, в этих местах и именно этот процесс приводит к эффекту полировки.

Наряду с геометрическими микронеровностями важную роль могут играть и другие неоднородности потенциального рельефа анода и электролита, связанные, например, с различиями работ выхода и положений уровня Ферми контактирующих между собой микрокомпонентов анодного сплава и раствора электролита. Это позволяет предложить следующую картину электролитно-разрядной полировки (рис. 2).

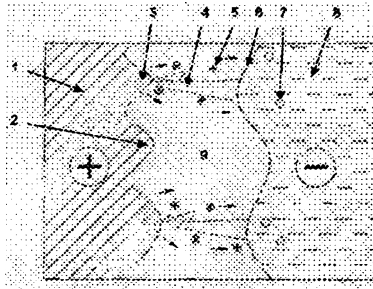


Рис. 2. Принцип полирования при ЭРОМ:

- 1 — деталь-анод; 2 — микронеровность; 3 — анодная зона разряда; 4 — канал разряда; 5 — частицы удаленного металла; 6 — волна электролита; 7 — пузырьки пара и газа; 8 — электролит — жидкий катод; 9 — парогазовая оболочка.

Выбор областей рабочих режимов процесса можно провести из анализа усредненной экспериментальной диаграммы напряжение-температура-концентрация электролита [3,4] (рис. 3).

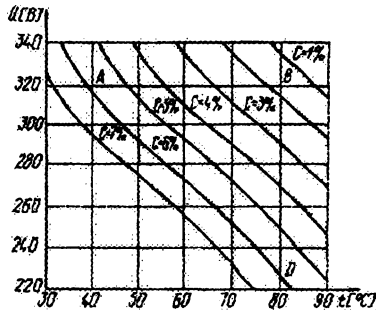


Рис. 3. Диаграмма рабочей области ЭРОМ

Устойчивой парогазовой оболочке, а следовательно, и нормальному протеканию процесса, на этой диаграмме соответствуют области, лежащие правее и выше линий концентрации электролита. При выборе рабочей точки ниже и левее кривой соответствующей концентрации, наблюдается срыв оболочки и переход к коммутационному режиму электролитной обработки. При этом происходит периодический контакт электролита с поверхностью детали. В местах контакта происходит обычное электрохимическое анодное растворение металла, приводящее к резкому снижению блеска и увеличению шероховатости. Так как потребляемый при этом ток значительно превышает ток при устойчивом процессе, то это вызывает резкое увеличение потребляемой мощности и снижение эконо-

мичности обработки. Поэтому коммутационный режим является нежелательным при полировании.

Рабочая область, в которой протекает процесс полирования, занимает на диаграмме зону, ограниченную линиями АБ — по напряжению, БВ — по температуре электролита, ВА — по концентрации электролита. Из диаграммы видно, что снижение концентрации и электролита приводит к увеличению минимальных значений напряжения и температуры электролита, при которых возможна устойчивая работа. При концентрации электролита менее 2% температура и напряжение близки к граничным, что делает нецелесообразным применение столь низких концентраций электролита. Еще одна диаграмма, связывающая концентрацию, температуру электролита и шероховатость обрабатываемой поверхности позволяет оптимизировать процесс полировки в конкретных технологических условиях.

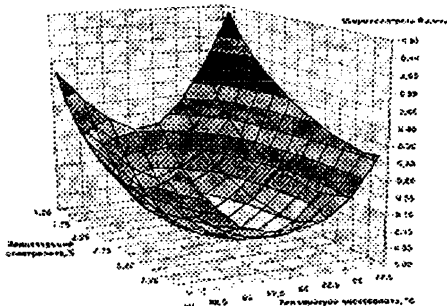


Рис. 4. Диаграмма зависимости шероховатости от концентрации и температуры электролита

Решение этой задачи существенно облегчается возможностью использования разработанной компьютерной программы для моделирования процесса ЭРОМ (рис.5)

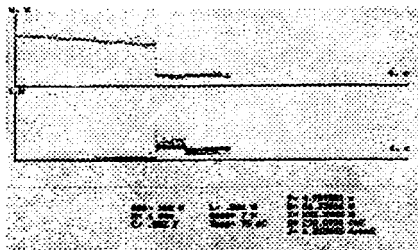


Рис. 5. Моделирование переходных процессов при ЭРОМ

Литература

1. Баковец В.В., Поляков О.В., Долговесова И.П. Плазменно-электролитическая анодная обработка металлов. Новосибирск, Наука, Сиб.отд., 1991, 168 с.
2. В.Н.Дураджи, А.С. Парсаданян. Нагрев металлов в электролитной плазме. Кишинев, Штиинца, 1988, 199 с.
3. Патент 1314729 СССР. Способ электрохимической обработки. В.К. Станишевский, А.Э. Паршутто, А.А. Кособуцкий.
4. Патент 5062541 США, МПК 204/224, 1991.

УДК 53(077)

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОБОБЩЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПРИНЦИПОВ ИНВАРИАНТНОСТИ

Лукашевич С.А., Желонкина Т.П., Литвиненко О.Г.
*УО «Гомельский госуниверситет им. Ф. Скорины»
Гомель, Беларусь*

Преобразование симметрии пространства не ограничивает выбора траектории изображающей точки в конфигурационном пространстве при изменении системы от некоторого начального состояния в конечное. В действительности реализуется только одно движение. В связи с этим возникает вопрос, а существует ли критерий, согласно которому из бесчисленного множества возможных движений можно выделить одно движение, которое является действительным? На этот вопрос в наиболее общем виде дает ответ вариационный принцип Гамильтона.

Опыт показывает, что действительное движение частицы или системы частиц между двумя точками пространства при данных условиях возможно только по какой-то одной определенной траектории. Это движение происходит при условии минимальной затраты или энергии, или времени или какой-либо другой физической величины.

Возникает важный теоретический интерес к исследованию проблемы: какие условия должны выполняться при движении механической системы по действительной траектории, если координаты ее точек бесконечно мало отличаются от координат точек множества траекторий, называемых виртуальными траекториями. Задача состоит в том.. чтобы результаты опытов обобщить и сформулировать принципы действи-

тельного движения механической системы в рамках геометрических принципов инвариантности.

Вычисление действительного движения из множества возможных движений механической системы осуществляется методами вариационного исчисления. Этот метод позволяет отразить движение не в данной точке траектории, а в а на ее отрезке, не в данный момент времени, а за конечный промежуток времени. Принципы, с помощью которых определяется действительное движение на конечном отрезке траектории или за конечный промежуток времени являются не дифференциальными, а интегральными. А так как эти принципы формулируются на основе понятия вариации, то они носят название интегральных вариационных принципов механики.

В 1833 году в работе Гамильтона «Проблема трех тел, рассмотренная с помощью моей характеристической функции» был сделан шаг в развитии принципа наименьшего действия, в результате которого он становится принципом всей физики. Характеристической функцией, о которой говорит Гамильтон, является действие, представленное в виде интеграла по времени:

$$S = \int_a^b L dt, \quad (1)$$

где $L = L(t, q_\sigma, \dot{q}_\sigma)$ — лагранжиан.

Принцип Гамильтона гласит: из всех возможных движений, приводящих систему частиц с наложенными на нее голономными стационарными идеальными и удерживающими связями из начального состояния $a(t_1, q_\sigma^{(1)})$ в конечное $b(t_2, q_\sigma^{(2)})$, в действительности реализуется то, для которого действие имеет экстремальное значение, т.е.

$$\delta \int_a^b L(t, q_\sigma, \dot{q}_\sigma) dt = 0, \quad (2)$$

Здесь задание начального и конечного состояний а и в равносильно заданию начальных условий в теории Ньютона.

В данном случае принцип Гамильтона здесь имеет смысл математического моделирования процесса обобщения предшествующей практики теоретической деятельности в учении о механическом движении. Для обоснования принципа (2) мы будем пользоваться центральным уравнением динамики. Будем сравнивать точки (c_1, c_2, \dots) действительного и вариационного движения в один и тот же момент времени. В этом случае $\delta q_\sigma \neq 0, \delta t = 0$. (Рис. 1.), причем в начальный и конечный момент времени все траектории системы совпадают так, что

$$(\delta q_\sigma)_{t_1} = (\delta q_\sigma)_{t_2} = 0, \quad (3)$$

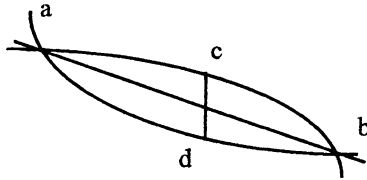


Рис. 1.

Следовательно, для каждого момента времени $t: t_1 > t_2$ допускаются преобразования координат конфигурационного пространства. При скоростях частиц приближающихся к скорости света, классический принцип наименьшего действия перестает удовлетворять принципу инвариантности Галлилея; с другой стороны, он не удовлетворяет и релятивистскому (хроногеометрическому) принципу инвариантности, поскольку классическая функция действия Гамильтона построена без учета взаимосвязи пространства и времени. Поэтому этот принцип наименьшего действия не отвечает общим требованиям геометрической инвариантности.

Чтобы принцип наименьшего действия непротиворечиво удовлетворял геометрической инвариантности, т.е. требованиям хроногеометрического принципа инвариантности, функция действия Гамильтона должна быть инвариантом преобразований координат пространства-времени, т.е. инвариантом пространства-времени. Из равенства нулю вариации действия $S(t, q_\sigma)$:

$$\delta S \equiv \frac{\partial S}{\partial q_\sigma} \delta q_\sigma = 0,$$

следует, что $\frac{\partial S}{\partial q_\sigma} = 0$, т.е. S явно от обобщенных координат не зависит, что возможно в однородном и изотропном пространстве. Симметрия пространства допускает существование множества траекторий, но из этого множества согласно равенству $\delta S = 0$, только одна является действительной, для которой S имеет экстремальное значение. В случае релятивистского обобщения равенство нулю вариации функции $S(x_i)$

$$\delta S \equiv \frac{\partial S}{\partial x_i} \delta x_i = 0$$

имеет место при равенстве нулю производной $\frac{\partial S}{\partial x_i} = 0$, из которого следует, что в условиях экстремума функция S не зависит явно от координат пространства-времени (x_1, x_2, x_3, x_4) , если пространство-время однородно. Теперь δx_i суть бесконечно малые изменения координат пространства-времени допускаемые наличием взаимосвязи пространства и времени, влекущей за собой существование десяти возможных независимых преобразований координат

пространства-времени: три пространственных поворота, четыре сдвига (три пространственных и один временной) и три пространственно-временных (-гиперболических) поворота, соответствующих преобразованию координат и времени при переходе от одной инерциальной системы к другой.

Таким образом в релятивистски обобщенном принципе Гамильтона содержатся вариации действия S , отвечающие бесконечно малым пространственно-временным поворотам, т.е. бесконечно малым изменениям скорости движения одной инерциальной системы отсчета относительно другой, для которых имеются бесконечно малые преобразования Лоренца, которые содержат пространственно-временные повороты, соответствующие преобразованию координат и времени при переходе от одной инерциальной системы к другой. Релятивистская функция действия должна быть инвариантом группы преобразований Лоренца.

Мы строим релятивистские функции действия для свободной частицы

$$S = -m_0 c \int_a^b ds,$$

для частицы в поле внешних сил

$$S = -m_0 c \int_a^b ds + \int_a^b P_i dx_i$$

и в частности для электрона в электромагнитном поле

$$S = -m_0 c \int_a^b ds + \frac{e}{c} \int_a^b A_i dx_i,$$

где P_i — четырехмерный импульс взаимодействия, A_i — четырехвектор потенциала электромагнитного поля, на инвариантах пространства-времени ds , $P_i dx_i$ и $A_i dx_i$.

Так как действие есть функция времени и координат: $S(t, q_\alpha)$, а релятивистское действие — функция координат пространства-времени: $S = S(x_i)$, где $i = 1, 2, 3, 4$, то в первом, классическом случае, аргумент функции отчетливо выражает отсутствие взаимосвязи пространства - времени, а во втором, релятивистском случае, — взаимосвязь пространства и времени очевидна. В первом случае время не варьируется, а во втором — варьируются все переменные пространства-времени. В классическом случае речь идет об отыскании действительной траектории системы частиц, которая выражается только через пространственные координаты, а при релятивистском обобщении находится действительная мировая линия-функция координат и времени.

Сказанное выше обобщим следующими словами: при всех возможных бесконечно малых преобразованиях симметрии однородного пространства-времени, оставляющей функцию действия инвариантной необходимым и достаточным условием действительного движения частицы является равенство нулю вариации этой функции, т.е. $\delta S = 0$, при $\delta x_i \neq 0$ ($i = 1, 2, 3, 4$), при условии, что в начальной a и конечной b мировых точках пространства-времени действительная и варьированная мировые линии совпадают:

$$(\delta x_i)_a \equiv (\delta x_i)_b = 0.$$

Следовательно, релятивистское обобщение принципа Гамильтона есть обобщенное выражение геометрических принципов инвариантности, а $\delta S = 0$ аналитическая форма представления этих принципов.

УДК 371.044:378.180

РОЛЬ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБРАЗОВАТЕЛЬНОМ ПРОЦЕССЕ

Манак И. С.

*Белорусский государственный университет
Минск, Беларусь*

Современные формы обучения в высших учебных заведениях должны обеспечивать подготовку специалистов, способных к творческому решению новых практических задач, неизбежно возникающих в результате постоянного развития науки и техники. Эффективным средством привития студентам навыков творческого использования знаний служит привлечение их к научно-исследовательской работе (НИР). Основной формой привлечения студентов и аспирантов к научным исследованиям в Белгосуниверситете является студенческая научно-исследовательская лаборатория (СНИЛ). При образовании СНИЛ полупроводниковых лазеров в октябре 1992 г. и выборе тематики исследований приоритет изначально был отдан фундаментальным исследованиям в области полупроводниковых инжекционных лазеров, включая квантоворазмерные лазеры на основе многослойных асимметричных гетероструктур и полупроводниковых легированных сверхрешеток, а также их практическим приложениям в диодной и светодиодной спектроскопии и лазерном медицинском приборостроении. В СНИЛ ежегодно выполняется 6 – 7 проектов, прошедших конкурсный отбор. В 2003 г. это 1 тема государственной программы фундаментальных исследований «Когерентность», 1 тема

межвузовской программы фундаментальных исследований «Низкоразмерные системы-2», по одному проекту Белорусского Республиканского фонда фундаментальных исследований (БРФФИ) и в рамках совместного с Российским фондом фундаментальных исследований, 1 молодежный проект БРФФИ и 1 молодежный грант БГУ. В рамках этих проектов в 2003 г. будет рассчитан параметр уширения плотности состояний с учетом корреляционных эффектов и проанализировано влияние корреляционных явлений на спектры испускания в сильнолегированных двумерных системах; будут изучены механизмы, приводящие к уширению линии генерации, и проведен анализ процессов генерации с учетом частичной потери когерентности возвращающегося в резонатор излучения при запаздывающей оптической обратной связи; будут учтены нелинейные эффекты смешения полей в инжекционных лазерах и установлена их связь с процессами рекомбинации, захвата и переноса носителей тока в квантоворазмерных гетероструктурах, а также предложены способы определения лазерных параметров квантоворазмерных гетероструктур на основе комплексного анализа амплитудно-частотных, энергетических, спектральных и поляризационных характеристик полупроводниковых квантоворазмерных лазеров, как в обычном режиме, так и в режиме подпитки внешним оптическим излучением; будут теоретически проанализированы процессы переноса носителей тока в $n-i-p$ структурах с учетом влияния эффектов экранирования носителями заряда и флуктуаций концентраций примесей на характер диффузии и дрейфа тока; будет изучен энергетический спектр и оптические зона – зонные и подзонные переходы в d -легированных трапециевидных сверхрешетках; будут рассчитаны вероятности оптических переходов между состояниями многоэлектронной системы и проведен численный анализ спектров излучения и поглощения с учетом многочастичных эффектов; будут сформулированы условия оптимизации структур лазерных диодов для генерации разностной моды, а также d -легированных трапециевидных сверхрешеток.

Кроме перечисленных, проводятся исследования в области лазеров на квантовых точках, квантово-каскадных лазеров, лазеров на напряженных гетероструктурах, в частности, в системе Ge-GeSi, а также по фотонным кристаллам.

СНИЛ стала базой выполнения курсовых и дипломных работ, магистерских и кандидатских диссертаций, прохождения производственной практики. Так, по тематике СНИЛ в 2003 г. под руководством 1 доктора физико-математических наук, профессора и 4 кандидатов физико-математических наук, доцентов, работают 15 студентов 3–5 курсов, 1 студент магистратуры и 4 аспиранта.

В лаборатории апробированы новые технологии обучения. В частности, созданы учебно-научные группы в составе преподавателя (руководителя), аспирантов и студентов. Работа в таких группах расширяет кругозор, воспитывает дух коллективизма, способствует мотивации творческого поиска и обеспечивает возможность планирования НИРС, которая позволяет на деле осуществлять связь учебной и научной работ, крепить связь науки и практики.

Такие приемы наиболее эффективно срабатывают там, где уделяется должное внимание формированию научных школ. Тогда вокруг коллектива исследователей начинают группироваться талантливые ученики. Здесь необходимо иметь в виду важную особенность вузовской науки: в условиях высшего учебного заведения исследовательская работа преподавателя – не самоцель. Она призвана служить делу воспитания будущих специалистов. Все знания, приобретенные студентами на лекциях и семинарах, как бы обширны они не были, всего-навсего профессиональный инструментарий. Реализовать же их можно только в движении мысли, которая прежде чем окрепнуть и стать самостоятельной, нуждается в поддержке и ориентирах.

Одним из важнейших принципов организации научно-исследовательской работы студентов (НИРС) является принцип преемственности, способствующий осуществлению систематической целенаправленной работы как на этапе обоснованного выбора темы научной работы, так и в процессе ее исполнения. Возможности данного принципа реализуются в структурном и генетическом аспектах. Суть первого из них состоит в том, что не только тематика исследований, но и формы проведения их разрабатываются с учетом междисциплинарных связей, при этом особенно большое значение придается фактору актуальности научной проблематики, как указывалось выше. Другим важным моментом структурного аспекта преемственности является увязывание тематики научных исследований студентов с теми проблемами, которые разрабатываются в СНИЛ. Преемственность в генетическом аспекте предполагает оптимальное планирование индивидуальной работы студента над избранной темой исследования в течение нескольких лет. Важно при этом сохранить последовательность от курсовой работы к научному исследованию, которое должно завершится реальным дипломным проектом, а в последующем магистерской и кандидатской диссертациями.

Кроме проведения научных исследований, постановки вычислительно-го эксперимента, студенты и аспиранты участвовали в разработке алгоритмов и программ, в создании 7 учебно-методических пособий лабораторного практикума по физике полупроводниковых лазеров и 3 учебных пособий по специальным курсам.

Таблица 1

Научные достижения студентов СНИЛ полупроводниковых лазеров в 1993–2002 гг.

Показатели Годы	Опубликовано статей	Опубликовано тезисов докладов	Получено патентов	Издано учебно-методических пособий	Подготовлено отчетов о НИР	Итоги участия в республиканских конкурсах на лучшую научную работу		
						I категория	II категория	III категория
1993	8	27	–	1	1	1	–	–
1994	4	39	1	2	–	Не проводился		
1995	22	22	–	1	2	2	1	–
1996	10	37	2	1	1	3	–	–
1997	23	13	1	–	3	2	–	1
1998	7	20	–	–	1	–	2	1
1999	10	11	–	–	3	2	–	–
2000	26	16	1	–	5	4	–	–
2001	18	11	1	–	3	6	–	–
2002	18	20	–	–	5	4	–	–

В этих публикациях нашли отражение приоритетные результаты, полученные в СНИЛ в области теории квантоворазмерных лазеров на асимметричных гетероструктурах и лазерных сверхрешетках. В результате выполненных исследований были предложены новые элементы функциональной оптоэлектроники: двухчастотный лазерный излучатель, бистабильный лазерный излучатель, перестраиваемый в широкой полосе лазер с постоянной выходной мощностью, двухчастотный лазерно-волоконный оптический модуль, термостабильный лазер на основе асимметричной кванторазмерной гетероструктуры с неоднородным возбуждением квантовых ям, многофункциональная двухсекционная лазерная структура на основе d-легированной сверхрешетки, позволяющая перестраивать длину волны генерируемого излучения в режимах стационарной генерации, переходного процесса и регулярных пульсаций. Некоторые разработки защищены патентами на изобретения. Получены экспериментальные образцы ряда приборов. Результаты исследований используются при чтении специальных курсов «Электромагнитная теория полупроводниковых лазеров», «Кинетическая теория инжекционных лазеров», «Теория полупроводниковых лазеров», «Физика полупроводниковых лазеров»,

Таким образом, четко прослеживается цепочка «наука – образование – наука», и студенты на качественно новом уровне профессиональной подготовки с успехом участвуют в выполнении научных проектов, реализуемых в СНИЛ полупроводниковых лазеров. В предлагаемой таблице суммированы научные достижения студентов СНИЛ полупроводниковых лазеров за 10 лет ее работы. За два последних года 10 студентов СНИЛ были награждены свидетельствами Специального фонда Президента Республики Беларусь по социальной поддержке одаренных учащихся и студентов за лучшую научную работу по физике, а СНИЛ были дважды выделены гранты финансовой поддержки этого же фонда.

В СНИЛ выполнено 9 магистерских диссертаций. 8 бывших членов СНИЛ стали кандидатами наук, 5 диссертаций подготовлено в СНИЛ, 3 защищены в срок и 1 досрочно.

УДК 620.130

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ИМПУЛЬСНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ С ВЕЩЕСТВОМ

Павлюченко В.В., Каравай А.П., Баранов А.А.
Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

Проведем оценку напряженности магнитной составляющей электромагнитного поля при воздействии импульсного электромагнитного поля на поверхность металла. Пусть на плоской границе раздела воздух и неферромагнитный металл в начальный момент времени вблизи металла за очень короткое время создается магнитное поле H_0 , нарастающее затем линейно со временем t . В силу уравнений Максвелла наряду с полем H_0 будет возникать также электрическое поле E_0 . Будем считать, что система полей \vec{H} и \vec{E} аппроксимируется плоской электромагнитной волной, распространяющейся по нормали к границе раздела двух сред вдоль оси x , направленной внутрь металла. В начальный момент времени векторы \vec{H}_0 и \vec{E}_0 лежат в плоскости параллельной границе раздела сред.

Пусть время нарастания H_0 мало. Из уравнений Максвелла вытекают граничные условия для \vec{E} на поверхности идеального проводника [1,2]:

$$\vec{E}_\tau = 0 \text{ или } \vec{E}_{\text{над}} + \vec{E}_{\text{отра}} = 0 \text{ при } x = 0$$

Тогда в полупространстве $x < 0$ наряду с падающей волной должна существовать и отраженная волна, с той же амплитудой, что и для падающей волны. Так как вектор Умова-Пойнтинга $\vec{S}_{\text{отр}}$ направлен вдоль оси x , то суммарное магнитное поле на поверхности $x = 0$ равно $H_x = H_{\text{над}} + H_{\text{отра}}$.

Откуда вытекает $H_x = 2H_{\text{отр}}$, т.е. на поверхности идеального проводника напряженность суммарного магнитного поля электромагнитной волны в 2 раза превышает напряженность магнитного поля падающей волны.

Таким образом, идеально проводящая полуплоскость в первом приближении полностью экранирует электромагнитное поле. При этом в воздухе возникает стоячая волна. Такой вывод хорошо подтверждается экспериментом [3] при малой длительности импульса электромагнитного поля.

Пусть длительность генерирования магнитного поля достаточно велика. Тогда происходит диффузное проникновение магнитного поля в металл. Вследствие этого отраженная волна слабеет и амплитуда волны, отраженной от поверхности металла, уменьшается с течением времени.

В проводящей среде можно пренебречь токами смещения в сравнении с токами проводимости и тогда приходим к параболическому уравнению магнитной диффузии [4]

$$\Delta \vec{H} - \frac{1}{\mu_0} \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} = 0$$

Это уравнение аналогично уравнению теплопроводности, для которого известно много точных аналитических решений. Для одномерного случая при распределении магнитного поля вдоль оси x имеем уравнение

$$\frac{\partial H}{\partial t} = a^2 \frac{\partial^2 H}{\partial x^2}, \quad (0 < x < \infty, t > 0),$$

где $a^2 = \mu_0$.

Граничное условие имеет вид

$$H|_{x=0} = \psi(t) = kt, \quad (t \geq 0),$$

а начальное условие записывается

$$H|_{t=0} = 0.$$

Такая постановка эквивалентна задаче о распространении тепла в полуплоскости. Решение этой задачи записывается в виде [5]

$$H(x, t) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_{\frac{x}{2a\sqrt{t}}}^{\infty} \psi \left(t + \frac{x^2}{4a^2\xi^2} \right) e^{-\xi^2} d\xi$$

При $x = 0$ получаем

$$H(x, 0) = \psi(t) \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\infty} e^{-\xi^2} d\xi = \psi(t)$$

Отсюда следует, что нарастание магнитного поля за счет его диффузии в металл происходит по линейному закону со временем:

$$H(t) = kt$$

где постоянная k есть скорость нарастания магнитного поля.

Отраженное от металла магнитное поле со временем будет убывать по закону $(2H_0 - kt)$.

Такой характер зависимости напряженности магнитного поля от длительности создания магнитного импульса у поверхности металла достаточно хорошо описывает экспериментальные результаты [3] для не слишком больших t .

В дальнейшем следует учитывать конечные размеры металлической пластины, так как магнитное поле отражается не только от передней поверхности

сти пластинки, но и от задней поверхности пластинки, а также уходит за пределы пластинки в другую сторону.

Литература

1. Баскаков С.Н. Электродинамика и распространение радиоволн. М., 1992.
2. Никольский В.В., Никольская Т.Н. Электродинамика и распространение радиоволн. М., 1989.
3. Павлюченко В.В., Каравай А.П. Применение магнитных датчиков для определения свойств различных материалов в импульсных электромагнитных полях. Магнитные материалы и их применение. Тезисы докладов. Мн., 1998, с. 153
4. Конопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля. М., 1972
5. Кошляков Н.С., Глинер Э.Б., Смирнов М.М. Уравнения в частных производных математической физики. М., 1970.

УДК621.372

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВВОДА ИЗЛУЧЕНИЯ В СВЕТОВОЛОКНО ПРИ ПОМОЩИ МИКРОЛИНЗЫ-ШАР

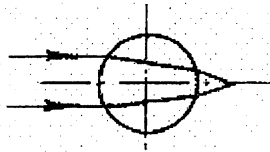
Ясюк Е.В., Развин И.Ю., Черный В.В.

Белорусский национальный технический университет

Минск, Беларусь

Датчики, выполненные на основе волоконно-оптических элементов, находят широкое применение в информационно-измерительных системах различного функционального назначения. Основной задачей в таких датчиках является создание эффективных устройств ввода излучения в световодный канал и оптических переходов между различными световодами. Одним из решений данной проблемы может быть использование сферических микролинз. Сферические микролинзы представляют собой выполненную из оптического материала полную сферу. Такие линзы могут применяться в волоконно-оптических линиях для согласования числовых апертур полупроводниковых лазерных излучателей и приемников излучения с соответствующими параметрами оптических волокон, в различных системах передачи оптического сигнала и в схемах согласования входа-выхода оптических каналов. Основными проблемами такого согласования являются получение оптиче-

кого контакта микролинзы с оптическим волокном, а также реализация возможности корректировки такого оптического согласования. В данной работе представлены результаты моделирования и экспериментального исследования оптических параметров сферической микролинзы, оптического контакта сферической микролинзы с многомодовым оптическим волокном, а также показана возможность управления эффективностью получаемого оптического согласования.



На представленном рисунке приведены оптическая схема линзы и ход лучей в ней. Оптические параметры данной сферической линзы определяются, прежде всего, ее диаметром (D) и показателем преломления оптического материала (n). В шаровой линзе выполняется условие круговой симметрии [1].

Пусть на такую линзу, находящуюся в воздухе, падает параллельный пучок света диаметром (d). Фокусное расстояние рассматриваемой линзы можно рассчитать по следующей формуле:

$$F = nD / 4(n-1)^2, \quad (1)$$

Однако, если такая линза находится в оптической среде с показателем преломления (n_{cp}), то в этом случае формула (1) принимает следующий вид:

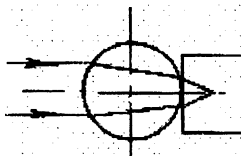
$$F = nD / 4(n - n_{cp})^2, \quad (2)$$

Необходимо отметить, что в зависимости от значений n и n_{cp} реализуются различные режимы работы рассматриваемой системы: при $n > n_{cp}$ — собирающая линза, $n < n_{cp}$ — рассеивающая линза и при $n = n_{cp}$ — аналог плоскопараллельной пластинки. Таким образом, используя оптическую среду с управляемым значением n_{cp} , можно получить сферическую линзу с изменяющимся фокусным расстоянием F . В качестве такой среды целесообразно использовать нематические жидкие кристаллы, значение показателя преломления которых зависит от воздействия на них управляющих полей различной физической природы [2]. В частности, можно применять термооптические и электрооптические эффекты в ЖК, приводящие к изменению его показателя преломления n_{cp} .

При формировании оптического контакта сферическая линза помещалась непосредственно на торец световолокна, как показано на рисунке. Числовая апертура исследуемой линзы определяется соотношением d / D и разностью $(n - n_{cp})$:

$$NA = 2d(n - n_{cp})^2 / nD, \quad (3)$$

Установлено, что эффективный ввод излучения в световолокно соответствует условию, когда значение NA линзы меньше числовой апертуры используемого светового волокна. В эксперименте применялись образцы микролинз различных диаметров (0,3 ... 0,06 мм), в качестве источников излучения использовались полупроводниковый и газовый (He-Ne) лазеры.



1. Бегунов Б.Н., Заказнов Н.П. Теория оптических систем. – М.: Машиностроение, 1973. – 488 с.

2. Блинов Л.М. Электро- и магнитооптика жидких кристаллов. – М.: Наука, 1978. – 350 с.

УДК 677. 017

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЯ УРОВНЯ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ ТЕКСТИЛЬНЫХ ПОЛОТЕН

Черногузова И.Г., Коган М.А.

*УО «Витебский государственный технологический университет»
Витебск, Беларусь*

Наличие научно-обоснованных методик выполнения измерений является обязательным условием обеспечения единства и требуемой точности измерений. Единство и точность измерений служат одним из метрологических резервов в общей работе, направленной на повышение качества промышленной продукции, в том числе продукции текстильной и легкой промышленности. Разработка методик, позволяющих получать достоверные результаты измерений, на сегодняшний день, является весьма важной задачей. Последнее особенно актуально в связи с проводимой в Республике Беларусь гармонизацией национальных и межгосударственных нормативных документов, в том числе и нормативных документов на методики выполнения измерений, с международными и европейскими.

Проведенный авторами анализ стандартной методики измерения уровня напряженности электростатического поля (УНЭСП) текстильных полотен выявил ряд недостатков, касающихся как самой методики, так и измерительного прибора ИЭС-П, рекомендуемого методикой в качестве измерителя напряженности электростатического поля (НЭСП) текстильных полотен [1].

Возникла необходимость поиска нового, более совершенного измерителя НЭСП, а также разработки нормативных документов на методики выполнения измерений УНЭСП текстильных полотен, позволяющих получать более точные и достоверные результаты измерений. Последнее также актуально в связи с тем, что показатель «уровень напряженности электростатического поля», характеризующий склонность текстильного материала к генерации электростатических зарядов, включен в перечень показателей безопасности при проведении сертификации продукции текстильной и легкой промышленности.

Авторами предложена методика измерения УНЭСП текстильных полотен, позволяющая избежать ряд недостатков стандартной методики измерения рассматриваемого показателя электростатических свойств текстильных полотен. Достигается это за счет учета параметров, оказывающих существенное влияние на величину УНЭСП текстильных полотен. К числу таких параметров относятся:

- расстояние от измерительного прибора до заряженной поверхности текстильного полотна;
- скорость процесса натирания исследуемого полотна образцом;
- время снятия величины УНЭСП текстильных полотен по показаниям прибора;
- усилие прижатия исследуемой пробы в процессе натирания;
- оптимальное положение исследователя в процессе измерения УНЭСП текстильных полотен и так далее.

В соответствии с предложенной авторами методикой измерения УНЭСП текстильных полотен, в качестве измерительного прибора использован измеритель напряженности электростатического поля российского производства марки ИЭСП-7. Прибор ИЭСП-7 предназначен для измерения напряженности электростатического поля в пространстве и до настоящего времени не использовался для измерения УНЭСП текстильных полотен. Данный измеритель по метрологическим, техническим и ряду эксплуатационным характеристикам полностью соответствует требованиям стандартной методики измерения УНЭСП текстильных полотен. Прибор ИЭСП-7 апробирован авторами в качестве измерителя УНЭСП текстильных полотен. Благодаря повышенной чувствительности, широкому диапазону измерений его использо-

вание позволяет получать легко воспроизводимые и достоверные результаты измерений. В то же время, наличие у прибора цифровой индикации показаний исключает ошибку при снятии результатов измерений по показаниям прибора. Конструкция данного измерителя обеспечивает мгновенное обнуление предыдущих показаний и позволяет скорректировать значение УНЭСР для конкретного объекта исследования с учетом НЭСР в помещении на момент проведения измерений.

Для измерения УНЭСР, в соответствии с разработанной методикой, отбирается не менее 5 образцов каждого вида текстильного полотна. Размер образца текстильного полотна — не менее 1 м². Исследуемые образцы перед проведением измерений выдерживают в расправленном виде в течение 24 часов в климатических условиях с температурой окружающей среды (15–35)°С, относительной влажностью воздуха (45–80)%, атмосферным давлением (645–795) мм рт. ст. В этих же условиях проводят измерения УНЭСР текстильных полотен.

Перед измерением УНЭСР из зоны измерения должны быть удалены все предметы, не имеющие непосредственного отношения к исследуемому текстильному полотну, которые могут повлиять на результаты измерений. Измерения проводят на деревянном столе высотой 1 м над уровнем пола. Расстояние между заряженной поверхностью текстильного полотна и торцевой поверхностью гильзы первичного преобразователя прибора ИЭСР-7 — не менее 0.1 м. Для устранения вносимых при измерении искажений, близкий к исследователю край корпуса прибора должен находиться на расстоянии не менее 0.4 м от исследователя. Так как на величину УНЭСР существенное влияние оказывает изменение условий окружающей среды, то, для получения достоверных результатов измерений, одежда исследователя должна быть изготовлена с использованием натуральных компонентов сырья. Измерения УНЭСР текстильных полотен проводят в 3 точках, расположенных на поверхности полотна по диагонали. Число измерений в каждой точке — 4. Измерения проводят сначала в состоянии покоя, а затем после натирания исследуемой пробы образивом. В качестве образива рекомендуется использовать шерстяную ткань полотняного переплетения. Натирание осуществляют 10 раз со скоростью 1 натирание в секунду. Величина скорости установлена экспериментально исходя из критерия оптимальности снятия значений УНЭСР по показаниям прибора ИЭСР-7. Снятие результатов измерений по показаниям прибора осуществляют на 7 секунде с момента включения прибора. Перед каждым повторным измерением электростатический заряд снимается с поверхности текстильного полотна заземленной металлической щеткой.

За окончательный результат измерений УНЭСР текстильных полотен принимают наибольшее из полученных результатов измерений по всем образцам текстильного полотна во всех точках измерения. Полученный результат сравнивают с допустимым значением УНЭСР текстильных полотен и делают вывод о соответствии или несоответствии исследуемого текстильного полотна требованиям санитарных норм по УНЭСР.

Предложенная авторами методика измерения УНЭСР текстильных полотен устанавливает порядок выполнения измерений при определении УНЭСР текстильных полотен при проведении государственной гигиенической регламентации и регистрации, а также на всех этапах государственного санитарного надзора.

Данная методика измерения УНЭСР текстильных полотен апробирована авторами на текстильных полотнах различного сырьевого состава и назначения (15 видов трикотажного полотна и 7 видов тканей). Полученные результаты измерений по рассматриваемому показателю электростатических свойств текстильных полотен с использованием прибора ИЭСР-7 характеризуются величиной УНЭСР:

- 0 кВ/м — для бельевых трикотажных полотен;
- (0.18–0.59) кВ/м — для трикотажных полотен, предназначенных для изготовления верхних трикотажных изделий;
- (0.7–11.2) кВ/м — для костюмных тканей.

Предельно допустимая погрешность измерений по данной методике находится в пределах основной погрешности прибора ИЭСР-7 и составляет 10%.

Методика может быть рекомендована к внедрению в качестве базовой для измерения УНЭСР текстильных полотен, а также использована для измерения рассматриваемого показателя не только в целях сертификации продукции, но при проведении научных исследований. Целесообразность внедрения предложенной методики подтверждается проведенным авторами расчетом плановой экономической эффективности ее внедрения. Экономическая эффективность методики получена за счет значительной экономии материальных средств и сокращения времени на проведение измерений.

УДК 539.19

КАЛИБРОВОЧНАЯ ТЕОРИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ФЕРМИОНОВ В ИСКРИВЛЕННОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Ционенко Д. А.

Белорусский национальный технический университет,
Минск, Беларусь

Геометрическими фермионами называются частицы с полуцелым спином, обладающие также и внутренними степенями свободы, допускающими геометрическое описание.

В рамках классической теории поля спиновые свойства частиц определяются генераторами преобразований группы Лоренца, представление которой осуществляют волновые функции соответствующих уравнений (см. [1]).

Так, для описания частиц со спином 1/2 используют уравнение Дирака [1,2]:

$$(\gamma^\mu \partial_\mu + m)\psi(x) = 0, \quad (1)$$

волновой функцией которого является 4-компонентный объект — биспинор. Матрицы уравнения γ^μ размерностью 4x4 удовлетворяют перестановочным соотношениям: $\gamma^\mu \gamma^\nu + \gamma^\nu \gamma^\mu = 2g^{\mu\nu}$, где $g^{\mu\nu}$ — метрический тензор пространства-времени.

В пространстве Минковского ($g^{\mu\nu} = \eta^{\mu\nu} = \text{diag}(1, -1, -1, -1)$), когда группа Лоренца является группой пространственно-временной симметрии, и ее преобразования задают переход из одной системы отсчета в другую, соответствующим преобразованиям подвергаются волновые функции уравнения:

$$\psi'(x') = \exp\{i\omega^{\mu\nu} J_{\mu\nu}\}\psi(x), \quad J_{\mu\nu} = \frac{1}{4}\gamma_\mu\gamma_\nu, \quad (2)$$

где параметры $\omega^{\mu\nu}$ определяются свойствами систем отсчета, между которыми осуществляется переход. Это обеспечивает ковариантность теории относительно преобразований Лоренца.

Кэлэром был предложен тензорный аналог уравнения Дирака, названный впоследствии уравнением Дирака-Кэлэра. Активное использование этого уравнения было определено развитием теории калибровочных полей в дискретном пространстве [3]. Перенесение теории, основанной на уравнении Дирака на решетку привело к трудностям, связанным с появлением дополнительных степеней свободы фермионов, которые не имеют физической интерпретации в континуальном пределе. Уравнение же Дирака-Кэлэра имеет одно и то же число степеней свободы как на решетке, так и в непрерывном

пространстве. Это объясняется тем, что спинор не является объектом геометрического происхождения в отличие от тензорных величин, которые допускают геометрическую интерпретацию. Роль уравнения Дирака-Кэлера при описании фермионов проявляется при рассмотрении теории в пространствах с топологией, отличной от топологии пространства Минковского.

В плоском пространстве уравнение Дирака-Кэлера имеет следующую матричную формулировку (см. [4,5]):

$$\left(\Gamma_{ab}^{\mu} \partial_{\mu} + mI_{ab}\right) \Phi_a(x) = 0; \quad a, b = 1+16, \quad \hbar = 1, \quad c = 1 \quad (3)$$

где 16-ти компонентная волновая функция $\Phi(x)$ является полным набором антисимметричных тензорных полей в пространстве размерности $n=4$:

$$\Phi(x) = (\varphi(x), \varphi_{\mu}(x), \varphi_{\mu\nu}(x), \varphi_{\bar{\mu}}(x), \varphi(x)), \quad (4)$$

где $\tilde{\varphi}(x) = 1/4! \varphi_{\mu\nu\rho\beta}(x) \varepsilon^{\mu\nu\rho\beta}$; $\varphi^{\bar{\beta}}(x) = 1/3! \varphi_{\mu\nu\rho}(x) \varepsilon^{\mu\nu\rho\beta}$ — псевдоскаляр и псевдотензор соответственно, $emnrs$ — псевдотензор Леви-Чивита ($\varepsilon^{1234} = -1$). Матрицы уравнения (4) подчиняются перестановочным соотношениям алгебры матриц Дирака:

$$\Gamma_{\mu} \Gamma_{\nu} + \Gamma_{\nu} \Gamma_{\mu} = 2g_{\mu\nu}, \quad (5)$$

то есть реализуют 16-мерное представление алгебры Клиффорда, которое в 4-мерном пространстве является приводимым, что находит свое отражение в существовании матриц G_m , коммутирующих с матрицами G_m и подчиняющихся перестановочным соотношениям:

$$[\Gamma_{\mu}, \Gamma'_{\nu}] = 0, \quad \{\Gamma'_{\mu}, \Gamma'_{\nu}\}_+ = 2g_{\mu\nu}. \quad (6)$$

Следовательно, теория, основанная на уравнении Дирака-Кэлера обладает группой симметрии, генерируемой матрицами G_m и их произведениями. Генераторы группы внутренней симметрии имеют вид:

$$D_A = (\Gamma'_{\mu}, \frac{1}{4} \Gamma'_{[\mu} \Gamma'_{\nu]}, \Gamma'_{\bar{\mu}}, \Gamma'_5), \quad A = 1+15, \quad (7)$$

где $G'_5 = G'_1 G'_2 G'_3 G'_4$. То есть группой внутренней симметрии является группа $SU(2,2)$. При этом ее действие на волновую функцию уравнения приводит к перемешиванию компонент, преобразующихся по различным неприводимым представлениям группы Лоренца.

Волновая функция уравнения (3) преобразуется по Лоренцу с генераторами

$$J'_{\mu\nu} = \frac{1}{4} (\Gamma'_{[\mu} \Gamma'_{\nu]} + \Gamma'_{[\mu} \Gamma'_{\bar{\nu}]}) \quad (8)$$

С точки зрения теории релятивистских волновых уравнений (РВУ), уравнение с волновой функцией, реализующей представление группы Ло-

ренца с генераторами (6) описывает частицу с набором спиновых состояний 0 и 1. Но внутренняя симметрия теории уравнения Дирака-Кэлера имеет в качестве подгруппы группу, генерируемую матрицами $d_{mn} = 1/4 G_{[m} \gamma_{n]}$, изоморфную $SO(3.1)$. Поэтому, когда симметрия теории не нарушена, возможно переопределение генераторов группы Лоренца:

$$J_{\mu\nu} \rightarrow J'_{\mu\nu} - d_{\mu\nu} = \frac{1}{4} \Gamma_{[\mu} \Gamma_{\nu]} \quad (9)$$

Теория с переопределенными генераторами описывает мультиплет частиц со спином 1/2, реализующих представление группы $SU(2.2)$ внутренней симметрии. Это связано с тем, что группа внутренней симметрии теории Дирака-Кэлера образует полупрямое произведение с группой Лоренца, и после переопределения спиновых свойств системы, определенных соотношением (7), мультиплет дираковских полей также будет обладать группой $SU(2.2)$ внутренней симметрии, но которая здесь уже является изотопической, не имеющей геометрической интерпретации.

Таким образом, когда группа внутренней симметрии уравнения Дирака-Кэлера не нарушена, посредством этого уравнения возможно описание частиц со спином 1/2, обладающих группой $SU(2.2)$ внутренней симметрии. Соответствие в описании частиц со спином 1/2 посредством уравнений Дирака и Дирака-Кэлера имеет место и при введении взаимодействия полей обоих типов с электромагнитным полем, которое осуществляется минимальным способом.

При обобщении теории Дирака-Кэлера на искривленное пространство, волновая функция уравнения является скаляром по отношению к преобразованиям координат многообразия и реализует представление локальной группы Лоренца с генераторами (6). Так как волновая функция представляет собой полный набор антисимметричных тензоров по отношению к локальной группе Лоренца, то преобразования группы $SU(2.2)$ внутренней симметрии не могут быть глобальными, поскольку их действие на волновую функцию определяется действием на тензоры. Поэтому в обобщенное уравнение Дирака-Кэлера необходимо ввести взаимодействие с неабелевым калибровочным полем A_m^A , соответствующим локализации группы внутренней симметрии. Общеквариантное уравнение Дирака-Кэлера имеет вид [7]:

$$\Gamma^\mu (\partial_\mu - iB_\mu^{(0)}) \frac{1}{4} (\Gamma_{(i)} \Gamma_{(j)} + \Gamma'_{(i)} \Gamma'_{(j)}) - iqA_m^A D_A) \Phi(x) + m\Phi(x) = 0$$

Калибровочное поле $B_\mu^{(0)}$ выражается через поле тетрадных элементов и является компенсирующим для локальных преобразований Лоренца (индексы (i) и (j) являются локальными лоренцевыми).

Анализ общековариантного уравнения Дирака-Кэлера (8) позволяет утверждать, что и в искривленном пространстве возможно описание частиц со спином 1/2 посредством этого уравнения. То есть решения уравнения (8) можно сопоставить решениям общековариантного уравнения Дирака, взаимодействующего с неабелевым калибровочным полем, соответствующим локализации группы SU(2.2) внутренней симметрии. В плоском пространстве соответствие было глобальным, а в искривленном пространстве – только в точке. При этом необходимо выполнение условий:

$$\delta_a^{(i)}(x)\delta_b^{(j)}(x)\tilde{F}_{\mu\nu}^{ab} = F_{\mu\nu}^{(i)(j)} + qR_{\mu\nu}^{(i)(j)}$$

$$\partial_\nu \delta_{(i)}^a(x) + B_{\nu(i)(j)} \delta^{a(j)}(x) - E_\nu^{ab} \delta_{b(i)}(x) = 0 ,$$

где величины $da(i)(x)$ и $db(j)(x)$ определяются соотношениями: $da(i)(x)=1$, если $a=(i)$, и $da(i)(x)=0$ в противном случае. Эти величины преобразуются по нижнему индексу согласно преобразований Лоренца, а по верхнему — согласно преобразований группы внутренней (изотопической) симметрии. $\tilde{F}_{\mu\nu}^{ab}$ — тензор напряженности калибровочного поля E_ν^{ab} , соответствующего локализации подгруппы SO(3.1) в случае дираковского поля, $F_{\mu\nu}^{(i)(j)}$ — соответствующий тензор напряженности в случае поля Дирака-Кэлера и $R_{\mu\nu}^{(i)(j)}$ — тензор напряженности поля $B_\mu^{(i)(j)}$, то есть тензор кривизны пространства-времени, два индекса которого превращены в реперные. Таким образом, при описании частиц со спином 1/2 посредством уравнения Дирака-Кэлера, тензор напряженности калибровочного поля, соответствующего группе внутренней симметрии, определяется тензором кривизны пространства-времени.

Как было показано в А.К. Горбачевичем [8], общековариантное уравнение Дирака можно рассматривать в качестве квантово механического уравнения движения в специальном координатном представлении с неортонормированными базисными векторами. Аналогичную интерпретацию допускает и уравнение (8). При этом выбор калибровки для поля A_μ^D должен быть связан с заданием системы отсчета. То есть выбор базиса в пространстве представления группы внутренней симметрии определяется заданием системы отсчета в пространстве-времени.

При построении квантовой механики необходим выбор систем отсчета, допускающих рассмотрение координат в виде 3+1 — системы, так как время в квантовой механике, являясь параметром, играет выделенную по отношению к координатам роль. Указанному условию удовлетворяет, в частности, система отсчета одиночного наблюдателя. Записывая в этой системе отсчета уравнение Дирака-Кэлера (8) в форме уравнения Шредингера и анализируя динамические переменные, приходим к выводу, что квантовая система, описываемая этим уравнением, после переопределения локальных преобразований

Лоренца согласно (7) описывает частицы со спином $1/2$. При этом система имеет дополнительные степени свободы, что приводит к зависимости ее энергии от нового квантового числа. Дополнительные степени свободы могут быть описаны в терминах момента инерции частицы, сопоставляемой волновой функции уравнения.

Отметим, что существует пространство, задаваемое как внешняя поверхность пятимерного гиперboloида, обладающее тем свойством, что каждая его точка ассоциируется с физическим объектом, обладающим помимо спиновых степеней свободы и собственным моментом инерции [9]. Поэтому сопоставление теории, основанной на общековариантном уравнении Дирака-Кэлера с теорией общековариантного уравнения Дирака естественно проводить в рамках указанного пространства, поскольку дополнительные степени свободы фермионов в обоих случаях имеют одинаковую физическую интерпретацию. В данном (гиперболическом) пространстве электростатический потенциал определяется формулой:

$$\varphi(r) = e \left(\frac{1}{r} - \frac{r}{a^2} - \frac{1}{a} \right),$$

где a — параметр, определяющий поверхность гиперboloида. Таким образом, введение электромагнитного взаимодействия в теорию приводит к возникновению закрученного потенциала. Последнее обстоятельство может быть положено в основу объяснения конфаймента кварков в рамках топологических методов.

Литература

1. Федоров Ф.И. //Изв. АН БССР. Сер. физ.-мат. 1967. N2. С.85-3.
2. Богуш А.А., Мороз Л.Г. Введение в теорию классических полей. Мн., 1968.
3. Becher P., Joos H. // Zeit. f. Phys. 1982. Bd 15. S. 343 – 361.
4. Стражев В.И., Плетюхов В.А. // Acta. Phys. Polon. 1981. Vol. B12. № 7. P. 651.
5. Стражев В.И. // Acta. Phys. Polon. 1978. Vol. B9. № 5. P. 449.
6. Стражев В.И. Спиновые степени свободы и калибровочные симметрии. Автореф. дис. докт. физ.-мат. наук. Мн., 1985.
7. Ционенко Д.А. // Изв. НАН РБ, 2002, Сер. Физ.-мат. №4. с. 75 - 84.
8. Горбачевич А.К. Квантовая механика в общей теории относительности. Мн., 1985.
9. Пестов А. Б. К проблеме объединения взаимодействий. Дубна, 1983. (Препринт / ОИЯИ: P2-83-506).

УДК 539.19

НЕСИММЕТРИЧНАЯ БИПАРАБОЛИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ЗАРЯДА В АТОМНЫХ ЯДРАХ

Тесевич Б.И., Кужир П.Г.

Белорусский национальный технический университет

Минск, Беларусь

В настоящей работе для описания плотности распределения $\rho(r)$ электростатического заряда в сферических атомных ядрах предложена модель, условно названная несимметричным бипараболическим распределением. Согласно этой модели радиальная плотность распределения заряда $\rho(r)$ в атомных ядрах, учитывающая наличие у ядра поверхностного слоя S , в пределах которого $\rho(r)$ спадает от 90% до 10% своего максимального значения ρ_0 в центре ядра, имеет вид:

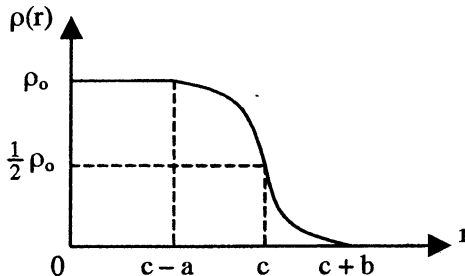
$$\rho(r \leq c - a) = \rho_0,$$

$$\rho(c \geq r \geq c - a) = \frac{\rho_0}{2a^2} [a^2 + 2ac - c^2 + 2(c - a)r - r^2], \quad (1)$$

$$\rho(c + b \geq r \geq c) = \frac{\rho_0}{2b^2} (r - c - b)^2,$$

$$\rho(r \geq c + b) = 0,$$

где c — радиус половинной плотности, т.е. $\rho_0 = \rho(c - a) = 2\rho(c)$, а значения параметров a , b и c зависят от выбора конкретного ядра и формы распределения заряда в нем.



Схематически радиальная функция $\rho(r)$ состоит из двух горизонтальных ($r \leq c - a$ и $r \geq c + b$) и двух параболических ($c \geq r \geq c - a$ и $c + b \geq r \geq c$) несимметричных участков (см. рисунок), причем

$$\left. \frac{d\rho}{dr} \right|_{r=c-a} = \left. \frac{d\rho}{dr} \right|_{r=c+b} = 0, \quad \left. \frac{d\rho}{dr} \right|_{r=c-0} = -\frac{\rho_o}{a}, \quad \left. \frac{d\rho}{dr} \right|_{r=c+0} = -\frac{\rho_o}{b}.$$

В случае симметричной бипараболической модели $b = a$.

Для любого центрально симметричного распределения заряда его плотность $\rho(r)$ должна удовлетворять условию нормировки, которое выбиралось в виде:

$$\int_V \rho(r) dV = 4\pi \int_0^\infty r^2 \rho(r) dr = 1.$$

С учетом этого условия после необходимых вычислений получаем следующее выражение для параметра ρ_o :

$$\rho_o = \frac{15}{\pi} [f_1(b) + f_1(-a)]^{-1}, \quad (2)$$

где $f_1(x) = 10x^2 + 5x^2c + x^3$. В частном случае симметричной бипараболической модели (при $b = a$) приходим к известному результату:

$$\rho_o = 3 [2\pi c(2c^2 + a^2)]^{-1}.$$

Учитывая, что $r(r_1) = 0,9r_o$ и $r(r_2) = 0,1r_o$, где $r_1 = c - a(1 - \sqrt{5}/5)$ и $r_2 = c + b(1 - \sqrt{5}/5)$, для толщины поверхностного слоя ядра S получаем следующее выражение:

$$S = r_2 - r_1 = (a + b)(1 - \sqrt{5}/5).$$

Как следствие, для симметричной бипараболической модели справедливо известное выражение:

$$S = 2a(1 - \sqrt{5}/5).$$

Среднеквадратичный радиус ядра r_s для центральных полей удовлетворяет соотношению:

$$r_s^2 = \langle r^2 \rangle = \int_V r^2 \rho(r) dV = 4\pi \int_0^\infty r^4 \rho(r) dr.$$

В случае распределения заряда вида (1) после проведения необходимых вычислений приходим к следующему равенству:

$$r_s^2 = \frac{2\pi\rho_o}{105} [42c^5 + f_2(b) + f_2(-a)], \quad (3)$$

где $f_2(x) = 35xc^4 + 35x^2c^3 + 21x^3c^2 + 7x^4c + x^5$.

Для симметричной бипараболической модели, когда $b = a$, с учетом соотношений (2) и (3) получаем известное выражение:

$$r_i^2 = \frac{2}{5} (3c^4 + 5a^2c^2 + a^4) (2c^2 + a^2)^{-1}.$$

Найдем аналитическое выражение для вычисления потенциальной энергии $V(r)$ атомной орбитальной частицы с зарядом $-e$ (например, для электрона в обычном атоме или мюона в мюонном атоме), движущейся в сферически симметричном поле атомного ядра с распределением заряда вида (1). Для ее вычисления используем известное решение уравнения Пуассона для центрального поля следующего вида:

$$V(r) = -4\pi Ze^2 \left[\frac{1}{r} \int_0^r y^2 \rho(y) dy + \int_r^\infty y \rho(y) dy \right],$$

где Ze — заряд ядра. В результате проведенных вычислений искомая функция $V(r)$ была представлена в таком виде:

$$V(r) = -4\pi Ze^2 \rho_0 v(r), \tag{4}$$

где множитель ρ_0 определяется согласно формуле (2), а функция $v(r)$ имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} v(r \leq c - a) &= \frac{c^2}{2} - \frac{r^2}{6} + \frac{b^2}{24} + \frac{cb}{6} + \frac{a^2}{24} - \frac{ca}{6}, \\ v(c \geq r \geq c - a) &= \frac{r^4}{40a^2} + \frac{(a - c) r^3}{12a^2} + \frac{(c^2 - 2ac - a^2) r^2}{12a^2} + \\ &+ \frac{c^2}{4} + \frac{cb}{6} + \frac{b^2}{24} - \frac{c^4}{24a^2} + \frac{c^3}{6a} + \frac{(c + b)^5}{60a^2 r}, \\ v(c + b \geq r \geq c) &= -\frac{r^4}{40b^2} + \frac{(c + b) r^3}{12b^2} - \frac{(c + b)^2 r^2}{12b^2} + \frac{(c - a)^4}{24b^2} - \\ &- \frac{c^5}{60b^2 r} - \frac{c^4}{12br} + \frac{10c^3 - 10c^2a + 5ca^2 - a^3}{60r}, \end{aligned}$$

$$v(r \geq c + b) = \frac{c^3}{3r} + \frac{1}{60r} (b^3 + 5cb^2 + 10c^2b - 10c^2a + 5ca^2 - a^3).$$

Несложно показать, что $V(r \geq c + b) = -Ze^2/r$, поскольку $v(r \geq c + b) = 1/(4\pi r)$.

Простой аналитический вид потенциальной энергии (4) позволяет легко найти, например, ее производную, т.е.

$$\frac{dV}{dr} = -4\pi Ze^2 \rho_0 \frac{dv}{dr},$$

где

$$\left. \frac{dv}{dr} \right|_{r \leq c-a} = -\frac{1}{3}r,$$

$$\left. \frac{dv}{dr} \right|_{c-a \leq r \leq c} = \frac{r^3}{10a^2} + \frac{(a-c)r^2}{4a^2} + \frac{(c^2 - 2ac - a^2)r}{6a^2} - \frac{(c-a)^5}{60a^2r^2},$$

$$\left. \frac{dv}{dr} \right|_{c+b \geq r \geq c} = -\frac{r^3}{10b^2} + \frac{(c+b)r^2}{4b^2} - \frac{(c+b)^2r}{6b^2} + \frac{c^5}{60b^2r^2} + \frac{c^4}{16br^2} - \frac{10c^3 - 10c^2a + 5ca^2 - a^3}{60r^2},$$

$$\left. \frac{dv}{dr} \right|_{r \geq b+c} = -\frac{1}{4\pi \rho_0 r^2}.$$

На границах областей изменения радиальной переменной получаем следующие значения функции v и ее производной

$$v(0) = \frac{c^2}{2} - \frac{ca}{6} + \frac{a^2}{24} + \frac{cb}{6} + \frac{b^2}{24},$$

$$v(c-a) = \frac{c^2}{3} + \frac{ca}{6} - \frac{a^2}{8} + \frac{cb}{6} + \frac{b^2}{24},$$

$$v(c) = \frac{c^2}{3} + \frac{cb}{6} + \frac{b^2}{24} - \frac{ca}{6} + \frac{a^2}{12} - \frac{a^3}{60c},$$

$$v(c+b) = \frac{10c^2b + 5cb^2 + b^3 - 10c^2a + 5ca^2 - a^3}{60(c+b)} + \frac{c^3}{3(c+b)},$$

$$\left. \frac{dv}{dr} \right|_{r=0} = 0, \quad \left. \frac{dv}{dr} \right|_{r=c-a} = -\frac{1}{3}(c-a),$$

$$\left. \frac{dv}{dr} \right|_{r=c} = -\frac{c}{3} + \frac{a}{6} + \frac{a^2(a-5c)}{60c^2}, \quad \left. \frac{dv}{dr} \right|_{r=c+b} = -\frac{1}{4\pi\rho_0(c+b)^2}.$$

Как частный случай, для симметричной бипараболической модели получаем

$$v(0) = \frac{c^2}{2} + \frac{a^2}{12},$$

$$v(r \leq c-a) = -\frac{r^2}{6} + \frac{c^2}{2} + \frac{a^2}{12},$$

$$v(c-a) = \frac{c^2}{3} + \frac{ca}{3} - \frac{a^2}{12},$$

$$v(c \geq r \geq c-a) = \frac{r^4}{40a^2} + \frac{(a-c)r^3}{12a^2} + \frac{(c^2 - 2ac - a^2)r^2}{12a^2} + \frac{1}{24a^2} [2a^2(2c^2 + a^2) - (c-a)^4] + \frac{(c-a)^5}{60a^2r},$$

$$v(c) = \frac{c^2}{3} + \frac{a^2}{8} - \frac{a^3}{60c},$$

$$v(c+a \geq r \geq c) = \frac{10a^2c(2c^2 + a^2) - (c+a)^5}{30r},$$

$$v(c+a) = \frac{c(2c^2 + a^2)}{6(c+a)}.$$

Чтобы получить использованные в (1) значения параметров a , b и c для конкретного ядра, можно воспользоваться параметрами распределения заряда, полученными при аппроксимации $\rho(r)$ для этих ядер в рамках других моде-

лей (например, однородного объемного, трапециевидного, фермиевского распределений заряда либо в симметричной бипараболической модели). Обязательным условием при этом в рамках любой модели следует считать постоянство среднеквадратичного радиуса ρ_s , значение которого определяется из эксперимента. Два остальных параметра распределения заряда вида (1) можно извлечь, например, считая неизменными экспериментальные значения толщины поверхностного слоя ядра S и радиуса половинной плотности s .

СОДЕРЖАНИЕ

МАШИНОСТРОЕНИЕ*Фирсов А. С., Мисевич В. С.*

Алгоритм определения профиля дисковой фасонной фрезы
для обработки винтовых канавок на цилиндрических инструментах 4

Беляков Н.В., Махаринский Е.И.

Технологические регламенты обработки
функциональных модулей корпусных деталей..... 8

Гришаев А.Н., Мисевич В.С.

Системные факторы генерации технологических методов
и их классификация 14

Климентьев А.Л., Мисевич В.С.

Формализованный выбор технологических методов 19

Масилевич А.В., Махаринский Е.И.

Математическое моделирование кинематических погрешностей
манипуляторов с использованием вероятностных методов 22

Мисевич В.С.

Автоматизация проектирования технологических процессов
многономенклатурного производства 26

Пашкевич М.Ф., Рогачевский Н.И., Рогачевский С.Н.

Анализ взаимодействия рабочих элементов
в пружинно-пальцевых передачах 31

Сюбаров В.В., Мисевич В.С.

Методика определения максимальной толщины
среза при зубофрезеровании 36

МЕТАЛЛУРГИЯ*Демидчик А.В., Шепелевич В.Г.*

Микротвердость быстрозатвердевших фольг
сплавов Вi-(8...12) ат. % Sb..... 42

*Александров В.М., Шабалинский А.А., Гасак Т.В.,**Бадькин А.А., * Михно В.П.**

Дренажные колпачки на основе вязаной
металлической сетки..... 45

Василевич Е.Ю., Гутько Е.С., Шепелевич В.Г.

Фазообразование в быстрозатвердевших фольгах сплавов алюминия 47

<i>Богинский Л.С., Петюшик Е.Е., Божко Д.И., Якубовский А.Ч.</i> Изостатическое прессование цилиндрических длинномерных заготовок на основе керамических материалов.....	50
<i>Петюшик Е.Е., Якубовский А.Ч., Божко Д.И.</i> Структурные характеристики деформированных тел намотки	56
<i>Логачев М.В., Исаевич Л.А., Карпицкий В.С.</i> Технология получения трубок малого диаметра из ленты.....	60
<i>Ложечников Е.Б., Бусел А.В., Ковалев Я.Н., Жуковин М.Г.</i> Гранулирование вязко-пластинчатых материалов в роliko-кольцевой мельнице.....	63
<i>Шепелевич В.Г., Анисович А.Г., Шахрай О.Н.</i> Структура и свойства быстрозатвердевших фольг свинца и его сплавов с кадмием.....	67
<i>Петюшик Е.Е., Азаров С.М., Макаrchук Д.В.</i> Разработка многослойных регенерируемых фильтроэлементов сложной формы.....	72

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ИНФОРМАТИКА

<i>Щетникович К.Г., Балашова О.В., Петренко И.Ф.</i> Кинематика шариков при обработке между соосными дисками и кольцом.....	78
<i>Буркин А.Н., Матвеев К.С., Махонь А.Н., Терентьева О.А.</i> Прибор для испытаний эластичных материалов и швов.....	83
<i>Минченя Н.Т., Савченко А.Л.</i> Измерение уровня вибраций шарикоподшипников.....	86
<i>Минченя Н.Т., Савченко А.Л.</i> Измерение момента трения в радиально-упорных шарикоподшипниках.....	88
<i>Развин Ю.В., Потачиц В.А.*, Лавровский Л.А.*</i> Исследование электрооптики микрообъемов модулирующих жидкокристаллических структур.....	90
<i>Воробей Р.И., Гусев О.К., Киреенко В.П., Тявловский А.К., Тявловский К.Л., Яржембицкий В.Б.</i> Разработка принципа хранения и передачи размера единицы концентрации электронными эквивалентами рабочих эталонов.....	94
<i>Гусев О.К.</i> Моделирование объекта в процедуре измерений концентрации носителей заряда.....	98

<i>Малаховская В.Э., Развин И.Ю.</i>	
Повышение эффективности ЖК-модулятора в схеме оптронной структуры.....	102
<i>Киселев М.Г., Минченя В.Т., Касьяненко И.А., Скарулис С.Д.</i>	
Влияние ультразвуковых колебаний на формирование алмазосносного слоя на боковых поверхностях распиловочных дисков способом их шаржирования.....	105
<i>Киселев М.Г., Минченя В.Т., Галенюк Г.А., Дроздов А.В.</i>	
Теоретическая оценка интенсифицирующего воздействия ультразвука на производительность процесса механического распиливания кристаллов алмаза.....	107
<i>Луговой В.П., Гаврилов А.</i>	
Станок для обработки кабошонов из поделочных камней для ювелирных изделий	113
<i>Киселев М.Г., Луговой В.П., Коленда Е.</i>	
Настольный ультразвуковой станок для обработки полудрагоценных камней и сверхтвердых материалов.....	116
<i>Киселев М.Г., Минченя В.Т., Скарулис С.Д., Касьяненко И.А.</i>	
Установка для шаржирования распиловочных дисков с использованием изгибных ультразвуковых колебаний.....	118
<i>Зайцева Е.Г., Гуляева И.В., Кириллов К.Ю., Заикин А.С., Бурак И.Н.</i>	
О возможности создания комплексов для массового обследования населения фонографическими методами.....	121
<i>Александров В.М., Мазюк В.В., Адзериho И.Э. *, Мрочек А.Г. *</i>	
Коронарные стенты из коррозионностойкой стали для эндоваскулярной терапии ишемической болезни сердца.....	125
<i>Баранов В.В.¹, Портнов Л.Я.², Холенков В.Ф.¹.</i>	
Полупроводниковый датчик для измерителей артериального давления.....	127
<i>Белявин К.Е., Минько Д.В., Чудаков О.П., Федченко И.Ю.</i>	
Пористый дентальный имплантат корневидной формы	130
<i>Ильющенко А.Ф., Савич В.В.</i>	
Порошковые материалы и покрытия в изделиях медицинской техники.....	135
<i>Кракасеvич С.В., Криштапович А.М., Бондарик В.М., Осипов А.Н.</i>	
Зависимость концентрации аэроионов от физических параметров воздушной среды	140
<i>²Гуминский А.М., ¹Куклицкая А.Г., ¹Олефир Г.И.</i>	
Исследование биофизического механизма коллатерального	

кровоснабжения через межсистемные анастомозы.....	145
<i>В.В. Савич¹, А.И. Воронович²</i>	
Биомеханические принципы конструирования имплантатов.....	148
<i>Сеньковский К.Г., Осипов А.Н.</i>	
Программное обеспечение комплекса многоканальной стимуляции скелетных мышц.....	155
<i>В.В. Савич¹, М.В. Тумилович¹, Е.Д. Белоенко², А.В. Бабкин², А.Н. Мазуренко²</i>	
Анизотропно-пористые имплантаты CVPI и TVPI из губчатого порошка титана для межтелового спондиллодеза в шейном и грудном отделах позвоночника.....	159
<i>Разоренов Д.Н., Разоренов Н.А.</i>	
Применение сетевых технологий в разработке образовательных приложений.....	164
<i>Разоренова Т.В.</i>	
Методика разработки информационного обеспечения учебного курса.....	168
<i>Бухвалова И.А., Житкевич А.П.</i>	
Разработка клиент-серверного приложения «Учебные планы специальностей БНТУ».....	173
<i>Горбачев М.В., Попова Ю.Б., Пащенко А.В.</i>	
Оптимизация режимов работы ТЭЦ в случае применения теплофикационных турбин с противодавлением.....	177
<i>Гурский Н.Н., Фурулжиев Р.И.</i>	
К вопросу построения информационных моделей колебаний транспортных средств	183
<i>Лакин В.И., Хенейни А.Х., Бабарика М.М., Чигирь Ю.И.</i>	
Масштабируемость решений при использовании системы «Galaktika»	187
<i>Ковалевский В.Б., Зенин В.Н.</i>	
Решение задачи стабилизации нагрева металла	190
<i>Кочуров В.А., Павловский М. С.</i>	
О методе создания объектно-ориентированных баз данных САПР	195
<i>Журавков М.А., Напрасникова Ю.В.</i>	
Численное исследование напряженного состояния массива горных пород с выработкой	199
<i>Пекарчик С.Е.</i>	
Автоматизация проектирования тактовых циклограмм работы производственного оборудования	204

<i>Буча В.В., Буча О.А., Ковалева И.Л.</i>	
Система перевода растрового изображения в векторное	209
<i>Новичихин Р.В., Шардыко П.П., Кустиков А.А.</i>	
Концепция экспериментального мобильного робота	213
<i>Москаленко А.А., Харлан С.Б., Позник Ю.Н., Кудина Г.А.</i>	
Алгоритмическое программное обеспечение для автоматизации учета электрической и тепловой энергии промышленных предприятий	217
<i>Новичихин Р.В., Лобовкин М.И., Новичихина Е.Р.</i>	
Опыт использования экспертных систем в учебном процессе	220

ТРАНСПОРТ

<i>Бренч М.П., Буренков Д.О.</i>	
Прогнозное выявление управляемых параметров ГРМ ДВС	230
<i>Хитрюк В.А., Логвинова Е.Н.</i>	
Математическая модель очистки моторного масла от загрязнений электростатическим очистителем	233
<i>Френкель С.Я.</i>	
О нормировании расхода дизельного топлива магистральными тепловозами	238
<i>Брезгунов Г.В.</i>	
Теоретическое обоснование способа внесения составляющих металлоплакирующей присадки Гретерин-3 для повышения интенсивности приработки деталей автотракторных двигателей	242
<i>Капский Д.В.</i>	
Прогнозирование аварийности на регулируемых перекрестках по методу потенциальной опасности	247
<i>Навой Д.В.</i>	
Специальные технологические алгоритмы в модернизируемых системах автоматизированного управления дорожным движением	251
<i>Рожанский Д.В.</i>	
Экспериментальная оценка интенсивности движения автотранспорта	256
<i>Свирковский С.В.</i>	
Совершенствование системы управления городским пассажирским транспортом	261
<i>Седюкевич В.Н., Свирковский С.В.</i>	
Разработка новой редакции Правил автомобильных	

перевозок пассажиров	265
<i>Тарасик В.П., Рынкевич С.А.</i>	
Интеллектуальная адаптивная система управления энергетическими режимами автомобиля	269
<i>Френкель Б.С.</i>	
Моделирование движения дизельного топлива в локомотивном депо	274

ЭНЕРГЕТИКА

Фурсанов М.И.

Об оптимизации разомкнутых электрических сетей по дискретным параметрам	280
---	-----

Фурсанов М.И.

Детерминированные расчеты и анализ режимов и потерь электроэнергии в распределительных электрических сетях 6-20 кВ	285
--	-----

Золотой А.А.

Расчеты основной электрической сети с использованием телемеханических режимных данных	291
---	-----

Климкович П.И.

Гашение пляски расщепленных проводов комбинированными гасителями колебаний	296
--	-----

Томкевич А.П., Янушкевич О.А.

Об аналитическом решении системы уравнений установившегося режима радиальной сети	301
---	-----

Седнин В.А., Седнин А.В., Кухта А.Н.

Применение частотных преобразователей на районной станции теплоснабжения	304
--	-----

Врублевский И.И., Есьман Р.И., Ярмольчик Ю.П.

Энергосберегающая технология для промышленных и промышленно-отопительных котельных	308
--	-----

Врублевский И.И., Есьман Р.И., Ярмольчик Ю.П.

Энергоэффективность включения ПТГ в тепловую схему малых и средних котельных	310
--	-----

Есьман Р.И., Ярмольчик Ю.П., Ярмольчик М.А.

Разработка высокоэффективного комплексного оборудования обработки активных поверхностей промышленных конструкций	314
--	-----

Качан А.Д., Качан С.А., Стрелкова О.А.

Цели и возможности эффективного применения	
--	--

суточного регулирования отпуска теплоты от ТЭЦ	319
<i>Балабанович В. К., Федерякин А. Н., Пантелей Е. А., Пантелей Н. В., Скоробогатый Н. Н., Глазков П. И., Кулак Е. В.</i>	
Методика расчета предельной величины заброса оборотов ротора турбины	325
<i>Балабанович В. К., Вербило И. Н., Скоробогатый Н. Н., Пантелей Е. А., Пантелей Н. В., Федерякин А. Н., Кулак Е. В., Глазков П. И.</i>	
Основные результаты расчетных исследований энерготехнологических установок комбинированного цикла типа ЭТУ *	329
<i>Балабанович В. К., Вербило И. Н., Скоробогатый Н. Н., Пантелей Е. А., Пантелей Н. В., Федерякин А. Н., Кулак Е. В., Глазков П. И.</i>	
Энерготехнологические установки комбинированного цикла	333
<i>Жихар И. Г.</i>	
Двухступенчатое сжигание природного газа в котлах	337
<i>Карницкий Н. Б., Буров А. Л., Рус В. В.</i>	
Особенности определения показателей надежности и экономичности ТЭС в условиях рыночной экономики	339

ЕСТЕСТВЕННЫЕ И ТОЧНЫЕ НАУКИ

Нифагин В. А.

Об одном варианте теории пластичности в конечных деформациях	345
--	-----

Анисимов В. Я., Голубева В. И., Нифагин В. А.

Использование математических пакетов Mathcad, Matlab при изучении высшей математики	349
---	-----

Бокуть Л. В.

Интерполяция на симплексах	353
----------------------------------	-----

Кулинич В. Н.

Граничные условия для уравнений Гинзбурга-Ландау и образование вихревой решетки в многослойных сверхпроводящих наноструктурах	356
---	-----

Березовский Н. И., Кужир П. Г., Попко С. В., Дубина М. М.

Исследование физических свойств гранита месторождения «Микашевичи»	361
--	-----

Бобученко Д. С.

Расчет фотонной запрещенной зоны для кристалла из сферических кластеров	364
---	-----

<i>Дудяк А.И., Доманевский Д.С., Гобиш Г., Новиков В.П., Жоховец С.В.</i> Влияние высоких давлений и температур на гексагональный нитрид галлия	369
<i>Степаненко А.В., Паршута А.Э., Доманевский Д.С., Кособуцкий А. А.</i> Исследование процесса электролитно-разрядной полировки в водных растворах солей аммония	372
<i>Лукашевич С.А., Желонкина Т.П., Литвиненко О.Г.</i> Аналитическое обобщение геометрических принципов инвариантности	377
<i>Манак И.С.</i> Роль научных исследований в образовательном процессе	381
<i>Павлюченко В.В., Каравай А.П., Баранов А.А.</i> Методика расчета импульсных электромагнитных взаимодействий с веществом	386
<i>Ясюк Е.В., Развин И.Ю., Черный В.В.</i> Исследование эффективности ввода излучения в световолокно при помощи микролинзы-шар	388
<i>Черногузова И.Г., Коган М.А.</i> Разработка методики измерения уровня напряженности электростатического поля текстильных полотен	390
<i>Ционенко Д.А.</i> Калибровочная теория геометрических фермионов в искривленном пространстве	394
<i>Тесевич Б.И., Куржир П.Г.</i> Несимметричная бипараболическая модель распределения плотности заряда в атомных ядрах	399
Содержание	405

Научное издание

Наука — образованию, производству, экономике
Материалы международной
научно-технической конференции
Т.1

Под общей редакцией д. т. н. проф. Хрусталева Б.М.,
д. т. н., проф. Соломахо В.Л.

Ответственный за выпуск *А.П. Аношко*
Технический редактор *О. Курятова*

Сдано в набор 8.08.03 г. Подписано в печать 15.09.03 г.
Бумага офсетная. Формат 60x84/16.
Гарнитура Таймс. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 24,0. Уч.-изд. л. 24,2. Тираж 100. Заказ 246.

Издано на УП «Технопринт», ЛВ № 380 от 28.04.99 г.
Отпечатано в типографии УП «Технопринт», ЛП № 203 от 26.01.03 г.
220027, Минск, пр-т Ф. Скорины, 65, корп. 14, оф. 317.
Тел. 231-86-93