

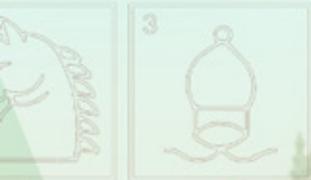
МОЛОДОЙ

ISSN 2072-0297

УЧЁНЫЙ

ежемесячный научный журнал

GALOIS
THEORY



Э. Галуа

16
2014
Часть I

$$\left(\cos \frac{2\pi k}{n+1} + i \sin \frac{2\pi k}{n+1} \right)^{n+1}$$

ISSN 2072-0297

Молодой учёный

Ежемесячный научный журнал

№ 16 (75) / 2014

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Главный редактор: Ахметова Галия Дуфаровна, *доктор филологических наук*

Члены редакционной коллегии:

Ахметова Мария Николаевна, *доктор педагогических наук*

Иванова Юлия Валентиновна, *доктор философских наук*

Лактионов Константин Станиславович, *доктор биологических наук*

Сараева Надежда Михайловна, *доктор психологических наук*

Авдеюк Оксана Алексеевна, *кандидат технических наук*

Алиева Тарана Ибрагим кызы, *кандидат химических наук*

Ахметова Валерия Валерьевна, *кандидат медицинских наук*

Брезгин Вячеслав Сергеевич, *кандидат экономических наук*

Данилов Олег Евгеньевич, *кандидат педагогических наук*

Дёмин Александр Викторович, *кандидат биологических наук*

Дядюн Кристина Владимировна, *кандидат юридических наук*

Желнова Кристина Владимировна, *кандидат экономических наук*

Жуйкова Тамара Павловна, *кандидат педагогических наук*

Игнатова Мария Александровна, *кандидат искусствоведения*

Каленский Александр Васильевич, *доктор физико-математических наук*

Коварда Владимир Васильевич, *кандидат физико-математических наук*

Комогорцев Максим Геннадьевич, *кандидат технических наук*

Котляров Алексей Васильевич, *кандидат геолого-минералогических наук*

Кузьмина Виолетта Михайловна, *кандидат исторических наук, кандидат психологических наук*

Кучерявенко Светлана Алексеевна, *кандидат экономических наук*

Лескова Екатерина Викторовна, *кандидат физико-математических наук*

Макеева Ирина Александровна, *кандидат педагогических наук*

Мусаева Ума Алиевна, *кандидат технических наук*

Насимов Мурат Орленбаевич, *кандидат политических наук*

Прончев Геннадий Борисович, *кандидат физико-математических наук*

Семахин Андрей Михайлович, *кандидат технических наук*

Сенюшкин Николай Сергеевич, *кандидат технических наук*

Ткаченко Ирина Георгиевна, *кандидат филологических наук*

Яхина Асия Сергеевна, *кандидат технических наук*

На обложке изображен Эварист Галуа (1811–1832) — французский математик, основатель современной высшей алгебры.

Статьи, поступающие в редакцию, рецензируются. За достоверность сведений, изложенных в статьях, ответственность несут авторы. Мнение редакции может не совпадать с мнением авторов материалов. При перепечатке ссылка на журнал обязательна. Материалы публикуются в авторской редакции.

АДРЕС РЕДАКЦИИ:

420126, г. Казань, ул. Амирхана, 10а, а/я 231. E-mail: info@moluch.ru; <http://www.moluch.ru/>.

Учредитель и издатель: ООО «Издательство Молодой ученый»

Тираж 1000 экз.

Отпечатано в типографии издательства «Молодой ученый», г. Казань, ул. Академика Арбузова, д. 4

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций.

Свидетельство о регистрации средства массовой информации ПИ № ФС77-38059 от 11 ноября 2009 г.

Журнал входит в систему РИНЦ (Российский индекс научного цитирования) на платформе elibrary.ru.

Журнал включен в международный каталог периодических изданий «Ulrich's Periodicals Directory».

Ответственные редакторы:

Кайнова Галина Анатольевна

Осянина Екатерина Игоревна

Международный редакционный совет:

Айрян Заруи Геворковна, кандидат филологических наук, доцент (Армения)

Арошидзе Паата Леонидович, доктор экономических наук, ассоциированный профессор (Грузия)

Атаев Загир Вагитович, кандидат географических наук, профессор (Россия)

Борисов Вячеслав Викторович, доктор педагогических наук, профессор (Украина)

Велковска Гена Цветкова, доктор экономических наук, доцент (Болгария)

Гайич Тамара, доктор экономических наук (Сербия)

Данатаров Агахан, кандидат технических наук (Туркменистан)

Данилов Александр Максимович, доктор технических наук, профессор (Россия)

Досманбетова Зейнегуль Рамазановна, доктор философии (PhD) по филологическим наукам (Казахстан)

Ешиев Абдыракман Молдоалиевич, доктор медицинских наук, доцент, зав. отделением (Кыргызстан)

Игисинов Нурбек Сагинбекович, доктор медицинских наук, профессор (Казахстан)

Кадыров Кутлуг-Бек Бекмуратович, кандидат педагогических наук, заместитель директора (Узбекистан)

Кайгородов Иван Борисович, кандидат физико-математических наук (Бразилия)

Каленский Александр Васильевич, доктор физико-математических наук, профессор (Россия)

Козырева Ольга Анатольевна, кандидат педагогических наук, доцент (Россия)

Лю Цзюань, доктор филологических наук, профессор (Китай)

Малес Людмила Владимировна, доктор социологических наук, доцент (Украина)

Нагервадзе Марина Алиевна, доктор биологических наук, профессор (Грузия)

Нурмамедли Фазиль Алигусейн оглы, кандидат геолого-минералогических наук (Азербайджан)

Прокопьев Николай Яковлевич, доктор медицинских наук, профессор (Россия)

Прокофьева Марина Анатольевна, кандидат педагогических наук, доцент (Казахстан)

Ребезов Максим Борисович, доктор сельскохозяйственных наук, профессор (Россия)

Сорока Юлия Георгиевна, доктор социологических наук, доцент (Украина)

Узаков Гулом Норбоевич, кандидат технических наук, доцент (Узбекистан)

Хоналиев Назарали Хоналиевич, доктор экономических наук, старший научный сотрудник (Таджикистан)

Хоссейни Амир, доктор филологических наук (Иран)

Шарипов Аскар Калиевич, доктор экономических наук, доцент (Казахстан)

Художник: Евгений Шишков

Верстка: Павел Бурьянов

СОДЕРЖАНИЕ

МАТЕМАТИКА

- Алишев А. Г., Якубова Н. М.**
Решение системы нелинейных дифференциальных уравнений высших порядков1

ФИЗИКА

- Байматов П. Ж., Пулатов А. А., Давлатов А. Б.**
О спектре электрона в квантовой точке Si-SiO₂ 5
- Байматов П. Ж., Пулатов А. А., Иноятов Ш. Т.**
К расчету энергии анизотропного D (-) центра методом Монте-Карло 8
- Байматов П. Ж., Пулатов А. А., Юсупов Д. А.**
Вариационный расчет энергии двухмерного D (-) центра 10
- Байматов П. Ж., Пулатов А. А.**
К расчету энергии экситона в сферической квантовой точке 11
- Данилов О. Е.**
Демонстрация зависимости распределения интенсивности интерферируемой волны вдоль прямой от расстояния между этой прямой и отрезком, соединяющим точечные источники когерентных волн, с помощью компьютерной модели15
- Емельянов А. А., Козлов А. М., Бесклеткин В. В., Авдеев А. С., Киряков Г. А., Чернов М. В., Габзалилов Э. Ф.**
Программирование синхронного неявнополюсного дугостаторного двигателя ($Z_1 = 6$) с трехфазной обмоткой индуктора с нулевым проводом19

Медов И. Р.

- Молекулярно-кинетическая теория. Внутренняя энергия тела 40

ХИМИЯ

- Набиев А. М., Азизов А. А., Алосманов Р. М., Меликова А. Я., Буният-заде И. А.**
Исследование строения фосфорилированного олефина методами ЯМР- и ИК-спектроскопии ..42

ИНФОРМАТИКА

- Блок И. Н.**
О способе унификации программно-алгоритмической модели многоагентных методов оптимизации на примере метода роя частиц45
- Жумагулова С. К., Абилдаева Г. Б., Шакирова Ю. К.**
Влияние развития информационных технологий на процесс обучения 50
- Хромов Д. О.**
Системы поддержки принятия решений для мониторинга работы ЛВС53

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

- Ахтамянов Р. М.**
Контроль процесса пневмодробеструйного упрочнения и технологическая оснастка56
- Бажина К. А., Гаврилова Е. В.**
Растительные компоненты в рецептуре мясного хлеба с точки зрения функционального питания59
- Бехбудов Ш. Х., Маджитов З. З.**
Анализ работы механизма с накопителем энергии с силовым замыканием 61

Домбровский В. П. Герметизация тальком как способ минимизации энергозатрат при изготовлении свечей зажигания.....63	Кущевский Н. А., Кошевко Ю. В. Влияние формофиксирующего аппарата на физико-механические свойства ткани 91
Жумаев К. К., Каландаров Н. О. Выявление внутренних и наружных дефектов трубопроводов ультразвуковыми дефектоскопами 67	Кущевский Н. А., Химич Г. Н. Влияние вида вибрации на качество формования объемных деталей головных уборов 94
Захаров Ю. А., Рылякин Е. Г., Лахно А. В. Анализ способов восстановления посадочных отверстий корпусных деталей машин 68	Рязанова К. С., Ступникова П. Б., Гаврилова Е. В. О качестве и безопасности полуфабрикатов мясных рубленых 96
Зольников В. К., Абдуллаев У. А. Математическая модель классификации состава выпускаемых изделий с использованием экспертных методов 71	Сенюшкин Н. С., Зырянов А. В., Султанов Р. Ф., Салимова И. И. Формирование требований к двигателям силовых установок летательных аппаратов 99
Кириченко А. С., Букин А. В. Передовые технологические процессы извлечения лома из железобетонных сооружений в отдаленных районах 74	Снежкина О. В., Киселев А. А., Ладин Р. А. Исследование работы железобетонных балок с пролетом среза $a/h_0=0,5$ 102
Колпак Е. П., Мальцева Л. С. Большие деформации резиновых мембран 78	Суров Л. Д., Филиппов В. В., Махиянова Н. В. Контроль отказа автоматического повторного включения головного выключателя линии, питающей трансформаторную подстанцию, при самоустранившемся двухфазном коротком замыкании 105
Коробков М. А. Ошибка преобразования в пространство лучей.....84	Суров Л. Д., Филиппов В. В. Способ контроля отказа отключения головного и отключения секционного выключателей при работе кольцевой сети в режиме подстанционного резервирования с определением вида короткого замыкания ... 108
Коробков М. А. Метод сокращения вычислительных затрат в алгоритме UCA-Root-Rare 88	

МАТЕМАТИКА

Решение системы нелинейных дифференциальных уравнений высших порядков

Алишев Абдуманнон Гафурович, кандидат физико-математических наук, доцент;

Якубова Нафиса Маратовна, магистр

Джизакский государственный педагогический институт (Узбекистан)

В литературе освещен вопрос о существовании и построения асимптотических решений систем линейных дифференциальных уравнений первого и второго порядков [1;3]. Что же касается систем уравнений высших порядков, то они изучены мало. Сведение таких систем к системам первого порядка повышает степень характеристического уравнения. Кроме того, такие сведение приводит к очень громоздким вычислениям.

Системы линейных дифференциальных уравнений высших порядка изучены в работе [4].

В данной работе исследуются системы нелинейных дифференциальных уравнений порядка $k \geq 2$ вида

$$\frac{d^k x}{dt^k} + A(\tau, \varepsilon)x = \varepsilon f(\tau, x, \varepsilon) \tag{1}$$

где x, f — n -мерный векторы, из них $x(t, \varepsilon)$ искомым, $A(\tau, \varepsilon)$ — n -мерный квадратный матрицы, $\varepsilon > 0$ малые параметр, $\tau = \varepsilon t \in [0, L]$ медленные время, $m \geq 2$ натуральный, $L > 0$ данный число, $A(\tau, \varepsilon)$ — квадратная матрица n -го порядка, допускаются разложения

$$A(\tau, \varepsilon) = \sum_{s=0}^{\infty} \varepsilon^s A_s(\tau) \tag{2}$$

Известно, что структура формальных, в смысле [1,2] частных решений системы (1) тесно связана с поведением корней так называемого характеристического уравнения

$$\det [A_0(\tau) - \lambda E] = 0, \tag{3}$$

где E — единичная матрица.

В настоящей работе рассматривается вопрос построения решения системы (1) при наличии нулевого корня уравнение (3), т. е. так называемый критический случай [5]. Этот случай, для системы вида (1) в литературе не рассматривались. Поэтому несомненно представляет определенный интерес исследование систем вида (1), к которым приводятся некоторые задачи физики и техники.

В дальнейшем будем считать, что выполняются условия:

1. Матрицы $A_s(\tau) (s = 0, 1, \dots)$ на отрезке $[0, L]$ неограниченное число раз дифференцируемы;
2. $f(\tau, x, \varepsilon)$ вектор в области $P(\tau, x) = P(\tau, x) * (0 < \varepsilon \leq \varepsilon_0]$, где $P(\tau, x)$ — некоторая область пространства переменных τ, x неограниченно дифференцируемых;
3. При $\tau \in [0, L]$ корни уравнение (3) удовлетворяют условия

$$\lambda_1(\tau) \equiv 0, \lambda_i(\tau) \neq 0, (i = \overline{2, n}), \operatorname{Re} \lambda_i(\tau) \leq 0 \tag{4}$$

$$(\psi, A_s(\tau)\varphi) \neq (\psi, f_x(\tau)\varphi), \forall \tau \in [0, L], \tag{5}$$

где $\varphi \in N(A_0(\tau)), \psi \in N(A_0^*(i))$. (см. [3]), для функции $f_x(\tau)$ дадим пояснение несколько позже.

Справедлива теорема.

Теорема 1. Если для системы дифференциальных уравнений (1) выполняются условия 1–4, то уравнения (1) имеет формальные частные решение вида

$$x(t, \varepsilon) = \sum_{s=0}^{\infty} \varepsilon^s u_s(\tau) \tag{6}$$

Доказательства. Подставляя (6) в (1), раскладывая вектор $f(\tau, u(\tau, \varepsilon), o)$ в ряд Тейлора в окрестности точки $(\tau, u_0(\tau), 0)$ и в полученном разложении собираем члены с одинаковыми степенями ε . Итак, имеет соотношение

$$\varepsilon^k u^k(\tau, \varepsilon) + A(\tau, \varepsilon)u(\tau, \varepsilon) = \varepsilon \{ f(\tau, u_0(\tau)) + \varepsilon [f_u(\tau)u_1(\tau) + f_1(\tau)] + \dots + \varepsilon^s [f_u(\tau)u_s(\tau) + f_s(\tau)] + \dots \} \tag{7}$$

где элементы матрицы $f_u(\tau) = \frac{\partial f^i}{\partial x^j}$ и компоненты вектора $f_1(\tau) = \frac{\partial f}{\partial \varepsilon}$ вычисляются в точке $(\tau, u_0(\tau), 0)$, а вектор $f_s(\tau)$ ($s=2,3,\dots$) выражаются определённым образом через $u_p(\tau)$, ($p = 0,1,\dots,s-1$).

Приравнявая коэффициенты при одинаковых степенях ε в равенства (7), получим рекуррентные уравнения для определения неизвестных элементов ряда (6).

$$A_0(\tau)u_0(\tau) = 0, \tag{8}$$

$$A_0(\tau)u_1(\tau) = -A_1(\tau)u_0(\tau) + f(\tau, u_0(\tau), 0), \tag{9}$$

$$A_0(\tau)u_2(\tau) = -A_1(\tau)u_1(\tau) + f_u(\tau)u_1(\tau) + f_1(\tau), \tag{10}$$

.....

$$A_0(\tau)u_s(\tau) = -A_1(\tau)u_{s-1}(\tau) + f_u(\tau)u_{s-1}(\tau) + F_{s-1}(\tau), \tag{11}$$

где

$$F_{s-1}(\tau) = f_{s-1}(\tau) - \sum_{i=1}^{s-1} A_i(\tau)u_{s-1-i}(\tau) - u_{s-k}^{(k)}(\tau), \quad s = 2,3,\dots$$

Покажем разрешимость этих уравнений, из уравнения (8) согласно [6], находим

$$u_0(\tau) = \varphi \eta_0(\tau), \tag{12}$$

где $\eta_0(\tau)$ - произвольные, отличные от нуля $\forall \tau \in [0, L]$, функции, которые определяем на следующем иначе.

Уравнение (9), с учетом (12) имеет вид

$$A_0(\tau)u_1(\tau) = -A_1(\tau)\varphi \eta_0(\tau) + f(\tau, \varphi \eta_0(\tau), 0) \tag{13}$$

Для разрешимости уравнения (13) необходимо и достаточно для $\forall \tau \in [0, L]$ выполнения условия разрешимости вида

$$(\psi, (A_1(\tau)\varphi \eta_0(\tau) - f(\tau, \varphi \eta_0(\tau), 0))) = 0 \tag{14}$$

Отсюда имеем

$$(\psi, A_1(\tau)\varphi \eta_0(\tau) - (\psi, f(\tau, \varphi \eta_0(\tau), 0))) = 0 \tag{15}$$

Таким образом, получаем нелинейное алгебраическое уравнение относительно неизвестных функции $\eta_0(\tau)$.

Предположим, что для уравнения (15) выполняются все условия теоремы о неявной функции [7] и определим $\eta_0(\tau)$. Так как условие разрешимости для уравнения (13) имеет место, то находим

$$u_1(\tau) = Q_1(\tau) + \varphi \eta_1(\tau), \tag{16}$$

где

$$Q_1(\tau) = -A_0^+(\tau) [A_1(\tau)\varphi c_0(\tau) + f(\tau, \varphi c_0(\tau), 0)],$$

$\eta_1(\tau)$ — неизвестная функция, которая определяется на следующем шаге, а $A_0^+(\tau)$ — обобщенно-обратная матрица к матрице $A_0(\tau)$, имеющая вид

$$A_0^+(\tau) = [A_0(\tau) + (\psi \otimes \varphi)]^{-1} - (\psi \otimes \varphi), \tag{17}$$

здесь (\otimes) - знак тензорного произведения векторов ψ и φ из R^n .

Учитывая (16), уравнение (10) запишем так

$$A_0(\tau)u_2(\tau) = -A_1(\tau)\varphi \eta_1(\tau) + f(\tau, \varphi \eta_1(\tau) + f_1(\tau) \tag{18}$$

Согласно условию разрешимости вида (14), получаем алгебраическое уравнение для определения $\eta_1(\tau)$

$$[(\psi, A_1(\tau)\varphi) - (\psi, f_u(\tau)\varphi)]\eta_1(\tau) = (\psi, f_1(\tau)). \tag{19}$$

Отсюда с учетом (5) имеем

$$\eta_1(\tau) = \frac{(\psi, f_1(\tau))}{(\psi, A_1(\tau)\varphi) - (\psi, f_u(\tau)\varphi)} \tag{20}$$

Условие (19) для уравнения (18) имеет место, то из уравнения (18) находим

$$u_2(\tau) = Q_2(\tau) + \varphi\eta_2(\tau), \tag{21}$$

где

$$Q_2(\tau) = -A_0^+(\tau)[A_1(\tau)\varphi\eta_1(\tau) - f_u(\tau)\varphi\eta_1(\tau) + f_1(\tau)],$$

а $\eta_2(\tau)$, как предыдущая неизвестная функция, определяется на следующем шаге.

Продолжая этот процесс, из (11) получаем уравнения для определения элементов $u_s(\tau)$ ряда (6), т. е.

$$A_0(\tau)u_s(\tau) = -A_1(\tau)\varphi\eta_{s-1}(\tau) + f_u(\tau)\varphi\eta_{s-1}(\tau) + Q_{s-1}(\tau), \tag{22}$$

где

$$Q_{s-1}(\tau) = f_{s-1}(\tau) - \sum_{i=1}^{s-1} A_i(\tau)\varphi\eta_{s-1-i}(\tau) - \varphi\eta_{s-k}^{(k)}(\tau), \quad s = 2, 3, \dots$$

Пусть для уравнения (22) выполняется условие вида (14)

$$(\varphi, (-A_1(\tau) + f_u(\tau))\varphi\eta_{s-1}(\tau) + Q_{s-1}(\tau)) = 0, \quad s = 2, 3, \dots \tag{23}$$

Отсюда получим

$$-(\varphi, (A_1(\tau) - f_u(\tau))\varphi)\eta_{s-1}(\tau) + (\varphi, Q_{s-1}(\tau)) = 0, \quad s = 2, 3, \dots \tag{24}$$

Из уравнения (24) определим неизвестная функции $\eta_s(\tau)$:

$$\eta_{s-1}(\tau) = \frac{(\varphi, Q_{s-1}(\tau))}{(\varphi, (A_1(\tau) - f_u(\tau))\varphi)}, \quad s = 2, 3, \dots \tag{25}$$

Так как для уравнения (22) условия (23) выполняются, то находим

$$u_s(\tau) = Q_s(\tau) + \varphi\eta_s(\tau), \tag{26}$$

где

$$Q_s(\tau) = A_0^+(\tau)[-A_1(\tau)\varphi\eta_{s-1}(\tau) + f_u(\tau)\varphi\eta_{s-1}(\tau) + Q_{s-1}(\tau)], \quad s = 2, 3, \dots,$$

а $\eta_s(\tau)$ неизвестная функция, определяется на следующем шаге.

Описанная здесь схема решения показывает, как можно найти элементы формального ряда (6), т. е. векторы $u_s(\tau)$ с любым номером $s = 0, 1, \dots$. Теорема 1 доказана.

В заключение рассматриваемого вопроса сформулируем теорему, указывающую на асимптотический характер построенного решения (6).

Теорема 2. Пусть для системы дифференциальных уравнений (1) выполняются условия теоремы 1 и вектор-функция $f(\tau, x, \varepsilon)$ удовлетворяет условия Липшица с постоянной l :

$$\|f(\tau, x, \varepsilon) - f(\tau, x_m, \varepsilon)\| \leq l\|x - x_m\| \tag{27}$$

а также

$$x(t, \varepsilon)/_{t=0} = x_m(t, \varepsilon)/_{t=0}, \quad \frac{d^q x}{dt^q} = \frac{d^q x_m}{dt^q}, \quad q = \overline{1, k-1}, \tag{28}$$

где $x(t, \varepsilon)$ — точное, $x_m(t, \varepsilon)$ — m - приближенное решение системы (1). Тогда для произвольного $L > 0$ существует постоянная $c > 0$, независящая от ε и такая, что $\forall \tau \in [0, L], \varepsilon \in (0, \varepsilon_0]$ имеют место неравенства

$$\|x(t, \varepsilon) - x_m(t, \varepsilon)\| \leq \varepsilon^m C, \tag{29}$$

$$\left\| \frac{d^q x}{dt^q} - \frac{d^q x_m}{dt^q} \right\| \leq \varepsilon^m C. \tag{30}$$

Литература:

1. Боголюбов, Н.И., Митропольский Ю.А. Асимптотические методы в теории нелинейных колебаний. — М.: Наука, 1974, — 504 с.
2. Фешенко, С.Ф., Шкиль Н.И., Ныколенко Л.Д. Асимптотические методы в теории линейных дифференциальных уравнений. — К: Наукова думка, 1966, — 252 с.
3. Сотниченко, Н.А., Фешенко С.Ф. Асимптотическое интегрирование дифференциальных уравнений. — К: 1980, — 48 с. — /Препринт/А.Н. УССР, Ин-т математики; 80. 3/.
4. Шкиль, Н.И., Кушнир В.А. Об асимптотическом решении систем линейных дифференциальных уравнений высших порядков в случае кратных корней характеристического уравнения. — В сб.: Суммирование расходящихся рядов и дифференциальные уравнения с малым параметром. К.: КГПН, 1985, с. 112–118.
5. Васильева, А.Б., Бутузов В.Ф. Сингулярной возмущение уравнения в критических случаях. — Изд. МГУ, 1978. — 107 с.
6. Алишев, А.Г. Решение нелинейных дифференциальных уравнений. Дробного ранга. ДАН. УССР. Сер А, №6, 1982, с. 6–9.
7. Фихтенгольц, Г.М. Основы математического анализа. — М: Наука, т. 1. 1968, — 464 с.

ФИЗИКА

О спектре электрона в квантовой точке Si-SiO₂

Байматов Пазилжан Жамолдинович, кандидат физико-математических наук, доцент;

Пулатов Анвар Абдуллаевич, кандидат физико-математических наук, доцент;

Давлатов Аброр Борижон-Угли, магистрант

Наманганский государственный университет (Узбекистан)

Кремний является одним из перспективных материалов микроэлектроники. В последние годы интенсивно исследуются физические свойства различных наноструктур на основе кремния и германия [1–12].

Важной задачей является расчет электрон — дырочных спектров наночастиц кремния погруженный в широкозонной диэлектрик, например в SiO₂. Для расчета электронного спектра необходимо учитывать специфики зоны: многодолинности, анизотропию масс электронов и. т. д., а валентная зона является сильно вырожденным. В подобных структурах поглощение света связано с переходом электронов и дырок в дискретных уровнях, что может быть использовано для создания фотоприёмников [13].

Теоретические расчеты электронно-дырочных спектров в приближении эффективной массы проведены во многих работах, например, на основе теории возмущений [14,15], или численным методом [16] применительно квантовой точки (КТ) Si-SiO₂ сферической формы.

В данной работе приведены результаты расчетов несколько нижних электронных уровней КТ Si-SiO₂, где, сфера заменяется «моделирующим кубом» (т. е. квантовым ящиком). Учтены конечности высоты потенциальных барьеров, анизотропию и скачок массы электронов на границе гетероперехода Si-SiO₂. Междолинное перемешивание не учитывалось. Значение полученных энергетических уровней сравниваются с результатами других авторов.

Уравнение Шредингера (УШ) для электрона вблизи «X» долины имеет вид

$$-\frac{\hbar^2}{2m_{\perp}} \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) \psi - \frac{\hbar^2}{2m_{\parallel}} \frac{\partial^2}{\partial z^2} \psi = E \psi \quad (1)$$

Если предположить, что КТ имеет кубическую форму, то переменные в УШ разделяется и требуется решать одномерной задачи (рис.1).

Гамильтониан, описывающий движение электрона по оси x имеет вид

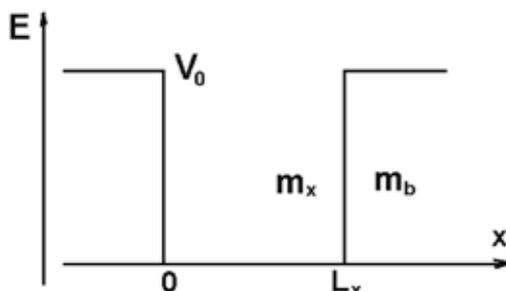


Рис. 1. Профиль потенциала гетероперехода по оси x, энергия отсчитывается от дна ямы

$$H = -\nabla_x \frac{\hbar^2}{2m(x)} \nabla_x + V(x), \quad V(x) = \begin{cases} 0, & x < L_x \\ V_0, & x > L_x \end{cases}, \quad m(x) = \begin{cases} m_x, & x < L_x \\ m_b, & x > L_x \end{cases} \quad (2)$$

Здесь $L_x = L_y = L_z = L$ — ребра куба, — высота потенциального барьера на границе гетероперехода Si-SiO₂, m_x, m_b — масса электрона в зоне проводимости наночастиц Si и в запрещенной зоне SiO₂ соответственно. Процедура решения задачи (2) (без учёта скачок массы) приведен во многих учебниках, см. например [17], которые в области I, II, III имеют вид

$$\psi_I(x) = ae^{\chi x}, \quad x < 0, \quad \chi = \sqrt{\frac{2m_b}{\hbar^2}(V_0 - E)} \quad (3)$$

$$\psi_{II}(x) = b \sin(kx + \alpha), \quad 0 < x < L_x, \quad k = \sqrt{\frac{2m_x}{\hbar^2} E} \quad (4)$$

$$\psi_{III}(x) = ce^{-\chi x}, \quad x > L_x, \quad \chi = \sqrt{\frac{2m_b}{\hbar^2}(V_0 - E)} \quad (5)$$

Граничные условия в точках 0 и L_x (условия Бастарда) имеют вид

$$\begin{cases} \psi_I(0) = \psi_{II}(0) \\ \frac{1}{m_b} \frac{\partial \psi_I(0)}{\partial x} = \frac{1}{m_x} \frac{\partial \psi_{II}(0)}{\partial x} \end{cases}, \quad \begin{cases} \psi_{II}(L_x) = \psi_{III}(L_x) \\ \frac{1}{m_x} \frac{\partial \psi_{II}(L_x)}{\partial x} = \frac{1}{m_b} \frac{\partial \psi_{III}(L_x)}{\partial x} \end{cases} \quad (6)$$

Поставляя сюда (3)-(5) и после некоторых упрощений получаем

$$\operatorname{tg}(\alpha) = \frac{k}{\chi} \frac{m_b}{m_x} = \mu, \quad \operatorname{tg}(kL_x + \alpha) = -\frac{k}{\chi} \frac{m_b}{m_x} = -\mu \quad (7)$$

Исключив α из системы (7) и учитывая периодичность функций, получаем

$$kL_x = \pi n_x - 2 \operatorname{Arcsin} \left(\frac{\mu}{\sqrt{1 + \mu^2}} \right), \quad n_x = 1, 2, 3, \dots \quad (8)$$

Это уравнение можно обобщить для других направлений и переписать так

$$E_{n_i} = \frac{\hbar^2 \pi^2 n_i^2}{2m_i L_i^2} \left(1 - \frac{2}{\pi n_i} \operatorname{Arcsin} \sqrt{\frac{m_b E_{n_i}}{(m_b - m_i) E_{n_i} + m_i V_0}} \right)^2 \quad (9)$$

Здесь $i = x, y, z$. В пределе равных масс $m_i = m_b$ из (9) получается известное трансцендентное уравнение [17]. Хотя, для одномерного движения частиц в потенциальной яме всегда существуют связанного состояния, условия связывания частиц в трехмерной яме определяется как

$$E_{n_x, n_y, n_z} = E_{n_x} + E_{n_y} + E_{n_z} < V_0 \quad (10)$$

Если приближенно заменить сферы с эквивалентным кубом (равные объёмы), то

$$\frac{4}{3} \pi R^3 = L^3, \quad D = 2R, \quad L = 0.806D \quad (11)$$

Согласно [14,15] $m_x = m_y = m_{\perp} = 0.19m_0$, $m_z = m_{\parallel} = 0.916m_0$, $m_b = m_0$, $V_0 = 3.2 eV$.

Численно решая уравнение (9) с учетом (10) (11) можно определить зависимость значения энергетических уровней E_{n_x, n_y, n_z} от диаметра сферы D . Результаты расчетов представлены на рис.2.

Цифры означают значений квантовых чисел n_x, n_y, n_z . Энергетические уровни вырождены по $\{n_x, n_y\}$, так как $m_x = m_y$. На вставке показан результат численного решения дифференциального уравнение (1) внутри сферической КТ Si-SiO₂ из работы [16]. Видно, что для нижних уровней результаты сходятся.

Обычно, в реальных условиях КТ не являются, идеально сферическими. По этой причине, для приближенного расчета энергетических уровней (в рамках принятых выше приближений) можно пользоваться методом квантового ящика.

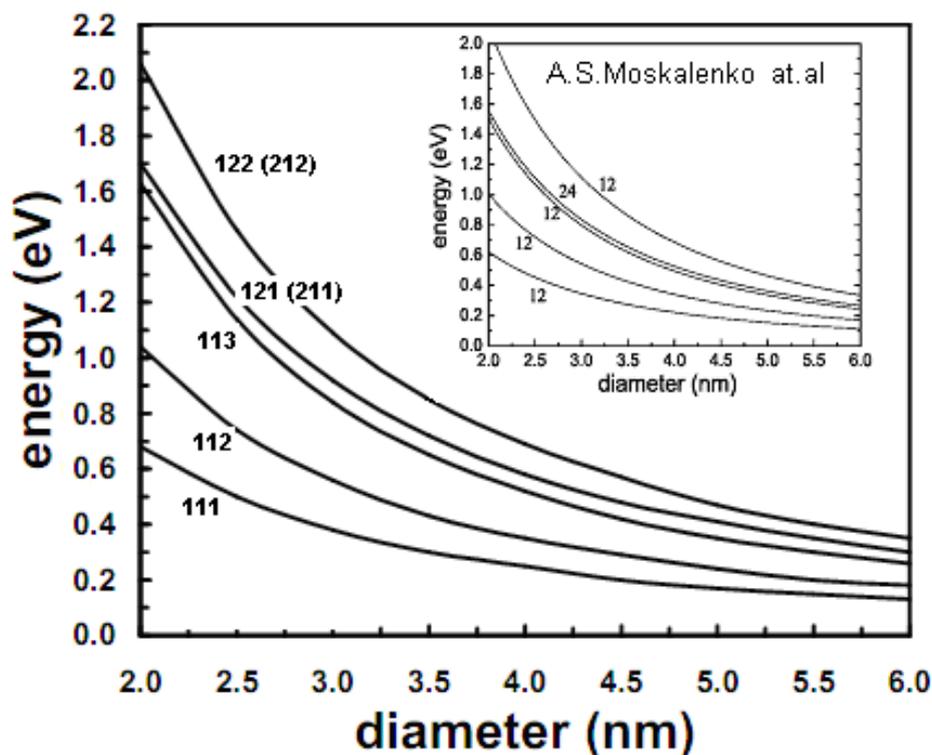


Рис. 2. Зависимость положение энергетических уровней электрона от диаметра сферы

Литература:

1. L. Pavesi, L. Dal Negro, C. Mazzoleni, G. Franzo, and F. Priolo, *Nature (London)* 408, 440 (2000).
2. M. V. Wolkin, J. Jorne, P. M. Fauchet, G. Allan, and C. Delerue, *Phys. Rev. Lett.* 82, 197 (1999).
3. M. Zacharias and P. M. Fauchet, *Appl. Phys. Lett.* 71, 380 (1997).
4. S. Takeoka, M. Fujii, S. Hayashi, and K. Yamamoto, *Phys. Rev.* B58, 7921 (1998).
5. L. T. Canham, *Appl. Phys. Lett.* 57, 1046 (1990).
6. A. Puzder, A. J. Williamson, J. C. Grossman, and G. Galli, *Phys. Rev. Lett.* 88, 097401 (2002).
7. P. D. J. Calcott, K. J. Nash, L. T. Canham, M. J. Kane, and D. Brumhead, *J. Phys.: Condens. Matter* 5, L91 (1993).
8. M. L. Brongersma, P. G. Kik, A. Polman, K. S. Min, and H. Atwater, *Appl. Phys. Lett.* 76, 351 (2000).
9. A. Y. Kobitski, K. S. Zhuravlev, H. P. Wagner, and D. R. T Zahn, *Phys. Rev. B* 63, 115423 (2001).
10. D. Kovalev, H. Heckler, G. Polisski, and F. Koch, *Phys. Status Solidi B* 215, 871 (1999).
11. F. A. Rebrodo, A. Franceschetti, and A. Zunger, *Phys. Rev. B* 61, 13073 (2000).
12. C. Delerue, M. Lannoo, and G. Allan, *Phys. Rev. Lett.* 84, 2457 (2000).
13. K. Brunner, *Rep. Progr. Phys.* 65, 27 (2002).
14. В. А. Бурдов. *ЖЭТФ* 121, 480–488, (2002)
15. В. А. Бурдов. *ФТП* 36, 1233–1236, (2002)
16. A. S. Moskalenko, J. Berakdar, A. A. Prokofiev and I. N. Yassievich. *Phys. Rev. B* 76, 085427 (2007).
17. Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. *Квантовая механика* (М., Наука, 1989).

К расчету энергии анизотропного $D(-)$ центра методом Монте-Карло

Байматов Пазилжан Жамолдинович, кандидат физико-математических наук, доцент;

Пулатов Анвар Абдуллаевич, кандидат физико-математических наук, доцент;

Иноятов Шукурилло Тургунбоевич, старший преподаватель

Наманганский государственный университет (Узбекистан)

В некоторых полупроводниках, например Si, Ge, PbTe, эффективные массы электронов вблизи дна зоны проводимости сильно анизотропны $\gamma = m_t/m_l < 1$ [1]. Для расчета энергии связи мелкого $D^{(0)}$ центра в приближении эффективной массы обычно используют вариационные методы [2,3]. Задача сильно усложняется в случае $D^{(-)}$ центров: необходимо одновременно учитывать межэлектронную корреляцию и анизотропию.

Квантовое сужение также сильно влияет на энергию двухэлектронных центров. Так, например, в полупроводниковых гетроструктурах GaAs/AlGaAs наблюдается значительный рост энергии связи $D^{(-)}$ центров в условиях гибридного квантования [4]. Из-за анизотропии масс даже расчет одноэлектронного спектра в сферической квантовой точке Si требует численных методов [5].

В настоящей работе для расчета полной энергии (а также энергия отрыва одного электрона) анизотропного $D^{(-)}$ центра применяется вариационный метод Монте-Карло (МК), который широко применяется в расчетах энергии атомных и молекулярных систем [6–9]. Гамильтониан этой системы имеет вид

$$h = -\left(\frac{\partial^2}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2}{\partial y_1^2}\right) - \gamma \frac{\partial^2}{\partial z_1^2} - \left(\frac{\partial^2}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2}{\partial y_2^2}\right) - \gamma \frac{\partial^2}{\partial z_2^2} - \frac{2}{r_1} - \frac{2}{r_2} + \frac{2}{r_2} \quad (1)$$

Здесь, энергия и длина измеряются в единицах

$$E_l = \frac{\hbar^2}{2m_l a_l^2}, \quad a_l = \frac{4\pi\epsilon\epsilon_0 \hbar^2}{m_l e^2}, \quad \gamma = \frac{m_t}{m_l} \quad (2)$$

Волновую функцию представим в виде

$$\psi = \phi(1)\phi(2) \left[1 + g r_{12} + b(r_1 - r_2)^2\right], \quad \phi(i) = \exp(-a\sqrt{x_i^2 + y_i^2 + cz_i^2}), \quad (3)$$

где величины r_1 - и r_2 -, соответственно радиус-векторы первого и второго электронов, а r_{12} – расстояние между ними. В (1) и (3) анизотропия учтена в одноэлектронных функциях $\phi(1)\phi(2)$, множитель в квадратной скобке описывает корреляции в движениях двух электронов. Согласно вариационному принципу, параметры a , c , g , b и полная энергия системы определяются из условий минимума функционала

$$J\{a, c, g, b\} = \frac{\langle \psi | h | \psi \rangle}{\langle \psi | \psi \rangle} \quad (4)$$

В изотропных двухмерных 2D ($\gamma = 0, z = 0$) и трехмерных 3D ($\gamma = 1, z \neq 0, c = 1$) пределах интегралы в функционале (4) вычисляются в координатах Хиллерааса (для 3D случая, см. например [10,11]).

В расчетах общее количество МК шагов составляет $K_{mc} = 5 \cdot 10^5$, а количество термализационных шагов равно $N_t = 0.2 K_{mc}$. Усреднения локальной энергии проводились по стандартному алгоритму Метрополиса

$$\langle E_L \rangle \approx \frac{1}{K_{mc}} \sum_{i=1}^{K_{mc}} E_L(\mathbf{R}_i) \pm \sqrt{\frac{\sigma}{K_{mc}}}, \quad \sigma = \langle E^2 \rangle - \langle E \rangle^2 \quad (5)$$

Здесь σ – дисперсия, \mathbf{R}_i – координаты точки блуждания в i -м шаге МК. Выражения для локальной энергии и плотности вероятности имеют вид

$$E_L(\mathbf{R}_i) = \frac{h\psi(\mathbf{R}_i)}{\psi(\mathbf{R}_i)}, \quad P(\mathbf{R}_i) = |\psi(\mathbf{R}_i)|^2 \quad (6)$$

и согласно (1) и (3) их можно определить аналитически. Шаги блуждания полагали анизотропными $\delta_{xy} \neq \delta_z$ и их значения определены в этапе термализации так, чтобы количество принятых состояний N_{acc} приблизительно составляло половину N_t . Параметры кремния и германия используемые в расчетах приведены в таблице.

Таблица 1

	m_t / m_0	m_l / m_0	γ	ε	E_f, meV
Ge	0.082	1.58	0.0519	16.0	4.36
Si	0.190	0.98	0.1939	11.9	18.3

Экстремальные значения параметров a, c, g, b были найдены сначала из условий минимума полной энергии. Экстремальные параметры a, c, g, b и энергия системы нами рассчитаны также из условий минимальности дисперсии σ , поскольку локальная энергия, определяемая из (6) с использованием (3), имеет кулоновскую сингулярность. Значения полных энергий, найденных двумя вышесказанными способами для значений параметра анизотропии в интервале $0.3 < \gamma^{1/3} < 1$, отличаются на малые проценты от общей энергии. На рисунке приведена зависимость величины минимизированной энергии для $D^{(-)}$ центра от параметра анизотропии, найденного первым вышеупомянутым способом. Для сравнения там же приведены результаты Кона и Латтинджера [2] для $D^{(0)}$ центра.

Согласно данному способу расчета, численные значения энергии связи одного электрона $D^{(-)}$ центра в Si и Ge в исходных единицах (2) соответственно равны 1.5806 meV и 0.4995 meV.

В данной работе вариационный метод МК применен к двухэлектронным центрам с анизотропией эффективных масс. Исходя из волновой функции $D^{(0)}$ центра Кона и Латтинджера, нами для $D^{(-)}$ центра построена пробная волновая функция, в которой добавлен простой корреляционный множитель, использованный Хиллераасом.

Обычно при моделировании изотропных объектов, таких как атомы, молекулы и атомные кластеры, сингулярность в локальной энергии исключаются с помощью функцией Жастрова. Если такое исключение затруднено, то необходимо проверить правильность полученных результатов. Сингулярность в локальной энергии в некоторых условиях (например, при понижении размерности или сильной анизотропии) могут породить большую дисперсию при МК усреднении. Наши расчеты показали, что для полупроводников Si и Ge при усреднении их полной энергии возможная ошибка составляет около одного процента от общей энергии $D^{(-)}$ центра.

Обобщая вышесказанное, можно заключить, что проведенные нами исследования особенности МК моделирования этих систем позволяют моделировать другие малые системы, такие как экситоны, биэкситоны и трионы с анизотропией масс носителей в наноструктурах, и выявлять роли межэлектронных взаимодействий и границы (геометрию) наноструктуры.

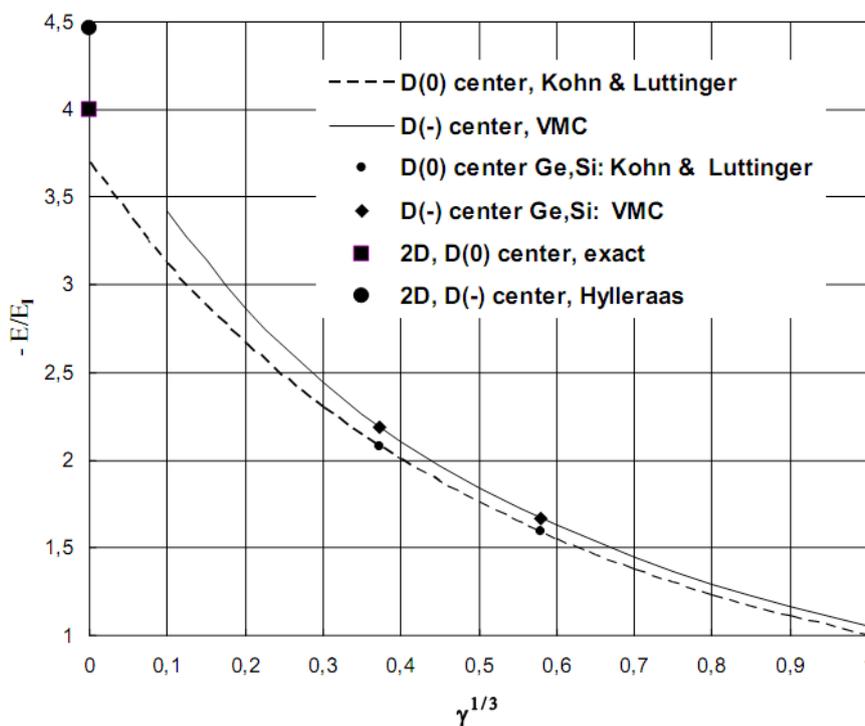


Рис. 1. Зависимость энергии $D^{(0)}$ (штриховая линия) и $D^{(-)}$ (сплошная линия) центров от параметра анизотропии $\gamma = m_t / m_l$

Литература:

1. Б. М. Аскеров. Электронные явления переноса в полупроводниках. М.: Наука. 320 с. (1985)
2. W. Kohn, J. M. Luttinger, Phys. Rev., 98, 915 (1955)
3. R. A. Faulkner, Phys. Rev., 184, 713 (1969)
4. S. Huan, S. P. Najda, Phys. Rev. Lett., 65 (12), 1486 (1990)
5. А. С. Москаленко, И. Н. Ясиевич, ФТТ. 46, 8 (2004) 1465
6. D. M. Ceperely and B. J. Alder, Phys. Rev. Lett., 45, 566 (1980)
7. D. M. Ceperely and L. Mitas, Advances in Chemical Physics, Vol XCIII, edited by I. Prigogine and S. A. Rice (John Wiley and Sons 1996)
8. Quantum Monte Carlo Methods in Physics and Chemistry, Eds. M. P. Nightingale and C. J. Umrigar, Nato ASI Ser. C 525, (Kluwer, Dordrecht, 1999)
9. B. L. Hammond, J. W. A. Lester and P. J. Reynolds, Monte Carlo Methods in Ab Initio Quantum Chemistry (World Scientific, Singapore, 1994)
10. М. Г. Веселов, Л. Н. Лабзовский. Теория атома. Строение электронных оболочек. М.: Наука. 328 с. (1986)
11. Ф. М. Морс и Г. Фешбах, Методы теоретической физики, т. 2. ИЛ, М., (1959)

Вариационный расчет энергии двухмерного $D^{(-)}$ центра

Байматов Пазилжан Жамолдинович, кандидат физико-математических наук, доцент;

Пулатов Анвар Абдуллаевич, кандидат физико-математических наук, доцент;

Юсупов Дилмурод Абдурашидович, преподаватель

Наманганский государственный университет (Узбекистан)

Квантовое сужение, создаваемое в двухмерной гетероструктуре, ограничивая движение носителей узкой областью пространства, изменяет свойства не только доноров или экситонов [1,2], но и двухэлектронных $D^{(-)}$, $X^{(-)}$ центров. Например, в полупроводниковых гетероструктурах GaAs/AlGaAs наблюдался значительный рост энергии связи $D^{(-)}$ центров в условиях гибридного квантования [3].

Для расчета энергии связи многочастичных центров $D^{(-)}$, $X^{(-)}$ в приближении эффективной массы обычно используют вариационные методы [4–6]. Более точные расчеты обычно требуют введения значительного количества вариационных параметров в волновую функцию системы [4,6]. В некоторых случаях для расчета энергии связи $D^{(-)}$, $X^{(-)}$ комплексов, можно воспользоваться более простыми пробными функциями. Волновая функция Чандрасекара, которая применяется в работе [5], содержит всего три параметра и имеет вид

$$\psi(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) = [\exp(-ar_1 - br_2) + \exp(-br_1 - ar_2)](1 + c|\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2|) \quad (1)$$

Симметризованная по координатам электронов (с учетом спина — антисимметричная) функция (1) напоминает корреляционное движение двух электронов, которые находятся на различных орбитах. При расчете энергии $D^{(-)}$ центра можно также воспользоваться трехпараметрической волновой функцией Хиллерааса

$$\psi = \exp[-a(r_1 + r_2)](1 + b|\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2| + c(r_1 - r_2)^2) \quad (2)$$

В данном случае корреляционное движение двух электронов происходит в одной орбите.

Расчет на основе (2) полной энергии двухмерного (2D) и трехмерного (3D) $D^{(-)}$ центра, энергии связи (отрыва) одного электрона и сравнение полученных результатов является целью данной работы.

$D^{(-)}$ центр напоминает отрицательного иона атома водорода $H^{(-)}$ и состоит из ионизованного донорного атома и двух электронов, движущихся в поле этого заряда. Гамильтониан этой системы имеет вид

$$h = -(\Delta_1 + \Delta_2) - \frac{2}{r_1} - \frac{2}{r_2} + \frac{2}{|\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2|} = 2(K + V) \quad (3)$$

Здесь энергия и длина измеряются в единицах

$$E_I = \frac{\hbar^2}{2m^* a_I^2}, \quad a_I = \frac{4\pi\epsilon\epsilon_0 \hbar^2}{m^* e^2} \quad (4)$$

Аналогично 3D случаю (см. [7,8]) переходим от переменных

$$r_1(x_1, y_1), \quad r_2(x_2, y_2), \quad r_{12} = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}$$

к новым переменным

$$s = r_1 + r_2, \quad t = r_2 - r_1 = r_1 - r_2, \quad u = r_{12} = |\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2|.$$

Окончательные результаты имеет вид

$$N = 2\pi \int_0^\infty ds \int_0^s du \int_0^u dt \frac{(s^2 - t^2)u}{\sqrt{s^2 - u^2} \sqrt{u^2 - t^2}} \psi^2(s, t, u),$$

$$K = 2\pi \int_0^\infty ds \int_0^s du \int_0^u dt \left\{ \frac{(s^2 - t^2)u}{\sqrt{s^2 - u^2} \sqrt{u^2 - t^2}} \left[\left(\frac{\partial \psi}{\partial s} \right)^2 + \left(\frac{\partial \psi}{\partial t} \right)^2 + \left(\frac{\partial \psi}{\partial u} \right)^2 \right] + 2 \frac{\partial \psi}{\partial u} \left[s \sqrt{\frac{u^2 - t^2}{s^2 - u^2}} \frac{\partial \psi}{\partial s} + t \sqrt{\frac{s^2 - u^2}{u^2 - t^2}} \frac{\partial \psi}{\partial t} \right] \right\},$$

$$V = 2\pi \int_0^\infty ds \int_0^s du \int_0^u dt \frac{(s^2 - t^2)u}{\sqrt{s^2 - u^2} \sqrt{u^2 - t^2}} \psi^2(s, t, u) \left[\frac{1}{u} - \frac{4Zs}{s^2 - t^2} \right]$$

В 3D и 2D случаях вычисленные с помощью пробной функции (2) полные энергии $D^{(-)}$ центра соответственно равны $E(3D) = -1.05062$ и $E(2D) = -4.46522$, т. е. при понижении размерности системы полная энергия возросло примерно ~ 4.3 раза.

Поскольку полная энергия $D^{(0)}$ центра в 2D случае равно -4 , то энергия связи (отрыва) одного электрона $D^{(-)}$ центра должна быть $E_B(2D) = 0.46522$. Более точное значение для $X^{(-)}$ триона было получено с использованием 22 варьируемых параметров [4], оно в пределе $\sigma = m_e / m_h = 0$ близко к нашему результату.

Литература:

1. Воробьев, Л. Е., Ивченко Е. Л., Фирсов Д. А., Шалыгин В. А. Оптические свойства наноструктур: Учеб. Пособие/Под ред. Е. Л. Ивченко и Л. Е. Воробьева. СПб.: Наука, 2001. — 188 с.
2. Шик, А. Я., Бакуева Л. Г., Мусихин С. Ф., Рыков С. А. Физика низкоразмерных систем/Под ред. А. Я. Шика. СПб.: Наука, 2001. 160 с.
3. S. Huant, S. P. Najda, Phys. Rev. Lett., 65 (12), 1486 (1990)
4. B. Stebe, A. Ainane, Superlatt. Microstruct., 5 (4), 545 (1989)
5. Сергеев, Р. А, Сурис Р. А, ФТТ., 43, 714 (2001). [R. A. Sergeev, R. A. Suris. Phys. Sol. St., 43, 746 (2001)].
6. J. Usukura, Y. Suzuki, K. Varga. Phys. Rev. B, 59 (9), 5652 (1999).
7. М. Г. Веселов, Л. Н. Лабзовский. Теория атома. Строение электронных оболочек. М.: Наука. 328 с. (1986)
8. Ф. М. Морс и Г. Фешбах, Методы теоретической физики, т. 2. ИЛ, М., (1959)

К расчету энергии экситона в сферической квантовой точке

Байматов Пазилжан Жамолдинович, кандидат физико-математических наук, доцент;

Пулатов Анвар Абдуллаевич, кандидат физико-математических наук, доцент

Наманганский государственный университет (Узбекистан)

1. Введение

Квантовые точки (КТ), полученные на основе различных гетероструктур, являются перспективными в применении различных оптоэлектронных приборах [1]. Теоретическое изучение спектра носителей в таких структурах является актуальным [2,3,6].

В работе [2] для КТ Si/SiO₂ в многозонном приближении эффективной массы для электронов и дырок численным методом решается уравнение Шредингера, а экситон моделировался с добавлением кулоновской энергии. В работе [3]

для изучения КТ на основе InAs/GaAs рассматривают простую зону, а реальная структура зоны учитывается непараболическостью в модели Кейна.

В данной работе предлагается упрощённая модель КТ сферической формы. Для получения энергии экситона применен вариационный метод и приближение эффективной массы. Функционал энергии экситона получен в аналитическом виде. Учтены конечности высоты потенциальных барьеров для электрона и дырок, скачок их массы на границе гетероструктуры, а также непараболическость их зоны.

2. Модель

Рассмотрим сначала состояние одной частицы в КТ, гамильтониан которого в приближении эффективной массы имеет вид

$$H = -\nabla \frac{\hbar^2}{2m(r)} \nabla + V(r), \quad V(r) = \begin{cases} 0, & r < R \\ V_0, & r > R \end{cases}, \quad m(r) = \begin{cases} m_i, & r < R \\ m_o, & r > R \end{cases} \quad (1)$$

где, V_0 – высота гетеробарьера, m_i, m_o – масса частиц внутри и вне КТ радиусом R . В границе гетероструктуры на волновую функцию

$$\varphi(r) = \begin{cases} \varphi_i(r) = A \frac{\sin(kr)}{r}, & r < R \\ \varphi_o(r) = B \frac{e^{-\chi r}}{r}, & r > R \end{cases}, \quad \text{где } k = \sqrt{\frac{2m_i E}{\hbar^2}}, \quad \chi = \sqrt{\frac{2m_o(V-E)}{\hbar^2}} \quad (2)$$

налагается условия

$$\varphi_i(R) = \varphi_o(R), \quad \left. \frac{1}{m_i} \frac{\partial \varphi_i}{\partial r} \right|_{r=R} = \left. \frac{1}{m_o} \frac{\partial \varphi_o}{\partial r} \right|_{r=R} \quad (3)$$

Для $1s$ – состояния получается хорошо известное уравнение

$$kR \operatorname{ctg}(kR) = 1 - \frac{m_i}{m_o} - \frac{m_i}{m_o} \chi R \quad (4)$$

или

$$\gamma \sqrt{\frac{E}{E_0}} \operatorname{ctg}\left(\sqrt{\frac{E}{E_0}}\right) = \gamma - 1 - \sqrt{\gamma \frac{V_0 - E}{E_0}}, \quad \text{где } \gamma = \frac{m_o}{m_i}, \quad E_0 = \frac{\hbar^2}{2m_i R^2} \quad (5)$$

Экситонное состояние требует учёта притяжения электрона и дырок. Тогда имеет смысл искать полную волновую функцию системы вариационным методом. Попробуем заменить (2) упрощённой пробной функцией

$$\varphi(r) = \begin{cases} \varphi_i(r) = A(1 - cr), & r < R \\ \varphi_o(r) = B e^{-ar}, & r > R \end{cases} \quad (6)$$

где, a и c вариационные параметры. Из граничных условий (3) найдем

$$\begin{cases} A(1 - cR) = B e^{-aR} \\ Ac/m_i = B a e^{-aR} / m_o \end{cases} \quad (7)$$

Исключив отсюда A и c имеем (далее можно положить $B=1$)

$$\varphi(r) = \begin{cases} \varphi_i(r) = e^{-aR} \left[1 + \frac{a}{\gamma} (R-r) \right], & r < R \\ \varphi_o(r) = e^{-ar}, & r > R \end{cases} \quad \gamma = \frac{m_o}{m_i} \quad (8)$$

Усреднённая энергия $1s$ – состояния равна

$$E = \frac{\hbar^2}{2m_i R^2} \frac{k}{n} + V_0 \frac{\nu}{n} \quad (9)$$

где, $aR = \alpha$ и

$$k = 5\alpha^2 (4\alpha^3 + 3\gamma(1 + 2\alpha + 2\alpha^2)) \quad (10)$$

$$\nu = 15\gamma^2 (1 + 2\alpha + 2\alpha^2) \quad (11)$$

$$n = 2\alpha^5 + 10\gamma\alpha^4 + 20\gamma^2\alpha^3 + 30\gamma^2\alpha^2 + 30\gamma^2\alpha + 15\gamma^2 \quad (12)$$

Приведем сравнение энергий (5) и (9) при следующих параметрах: $V_0 = 1\text{eV}$, $m_i = 0.3m_e$, $m_o = 1m_e$ (см. Таблицу 1). Видно, что относительная ошибка составляет менее 1 % при $R=10$ ангстрем, и уменьшается с ростом радиуса КТ.

Таблица 1

R, Ангстрем	10	20	30	40	50	60
E, eV из (5)	0.422	0.169	0.091	0.057	0.039	0.028
E, eV из (9)	0.426	0.171	0.092	0.057	0.039	0.028

Гамильтониан экситона имеет вид (индекс 1 относится для электрона, 2 – для дырок)

$$H = -\nabla_1^2 \frac{\hbar^2}{2m_1(r_1)} - \nabla_2^2 \frac{\hbar^2}{2m_2(r_2)} - \frac{e^2}{4\pi\epsilon\epsilon_0 |\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2|} + V(r_1) + V(r_2) \quad (13)$$

где

$$m_{1,2}(r_{1,2}) = \begin{cases} m_{1i,2i}, & r_{1,2} < R \\ m_{1o,2o}, & r_{1,2} > R \end{cases}, \quad V(r_{1,2}) = \begin{cases} 0, & r_{1,2} < R \\ V_{10,20}, & r_{1,2} > R \end{cases} \quad (14)$$

Диэлектрической проницаемости, считаем одинаковыми всюду.

Полную волновую функцию экситона запишем в виде $\psi(r_1, r_2) = \varphi(a, r_1)\varphi(b, r_2)$, где $\varphi(a, r_1)$, $\varphi(b, r_2)$ относится электрону и дырок соответственно, и имеет аналогично (8) вид

$$\varphi(a, r_1) = \begin{cases} \varphi_i(r_1) = e^{-aR} \left[1 + \frac{a}{\gamma_1}(R-r_1) \right], & r_1 < R \\ \varphi_o(r_1) = e^{-ar_1}, & r_1 > R \end{cases}, \quad \varphi(b, r_2) = \begin{cases} \varphi_i(r_2) = e^{-bR} \left[1 + \frac{b}{\gamma_2}(R-r_2) \right], & r_2 < R \\ \varphi_o(r_2) = e^{-br_2}, & r_2 > R \end{cases} \quad (15)$$

Здесь, $\gamma_1 = m_{1o} / m_{1i}$, $\gamma_2 = m_{2o} / m_{2i}$. Усредненная энергия экситона равна

$$E_{ex} = E_1 + E_2 - V_c = \frac{\hbar^2}{2m_{1i}R^2} \frac{k_1}{n_1} + V_{10} \frac{v_1}{n_1} + \frac{\hbar^2}{2m_{2i}R^2} \frac{k_2}{n_2} + V_{20} \frac{v_2}{n_2} - \frac{e^2}{4\pi\epsilon\epsilon_0 R} \frac{c}{n_1 n_2} \quad (16)$$

где, введены обозначения $aR = \alpha$, $bR = \beta$ и

$$n_1 = 2\alpha^5 + 10\gamma_1\alpha^4 + 5\gamma_1^2(4\alpha^3 + 6\alpha^2 + 6\alpha + 3), \quad n_2 = 2\beta^5 + 10\gamma_2\beta^4 + 5\gamma_2^2(4\beta^3 + 6\beta^2 + 6\beta + 3)$$

$$k_1 = 5\alpha^2(4\alpha^3 + 3\gamma_1(1 + 2\alpha + 2\alpha^2)), \quad k_2 = 5\beta^2(4\beta^3 + 3\gamma_2(1 + 2\beta + 2\beta^2))$$

$$v_1 = 15(1 + 2\alpha + 2\alpha^2)\gamma_1^2, \quad v_2 = 15(1 + 2\beta + 2\beta^2)\gamma_2^2, \quad c = c_1 + c_2 + c_3 + c_4 + c_5 + c_6,$$

$$c_1 = 30\alpha^3\beta\gamma_2^2(1 + 2\beta)(10\gamma_1^2 + \alpha^2 + 5\gamma_1\alpha), \quad c_2 = 30\alpha\beta^3\gamma_1^2(1 + 2\alpha)(10\gamma_2^2 + \beta^2 + 5\gamma_2\beta)$$

$$c_3 = \frac{5}{7}\alpha^3\beta^3(\gamma_2\beta(104\gamma_1\alpha + 252\gamma_1^2 + 17\alpha^2) + \gamma_2^2(112\gamma_1\alpha + 336\gamma_1^2 + 16\alpha^2) + \beta^2(28\gamma_1\alpha + 60\gamma_1^2 + 5\alpha^2))$$

$$c_4 = \frac{5}{7}\alpha^3\beta^3(\gamma_2\beta(104\gamma_1\alpha + 112\gamma_1^2 + 28\alpha^2) + \gamma_2^2(252\gamma_1\alpha + 336\gamma_1^2 + 60\alpha^2) + \beta^2(17\gamma_1\alpha + 16\gamma_1^2 + 5\alpha^2))$$

$$c_5 = \frac{225\alpha\beta^3\gamma_1^2\gamma_2^2}{(\alpha + \beta)^4} ((4\alpha + 2)\beta^3 + (2 + 12\alpha + 12\alpha^2)\beta^2 + (18\alpha^2 + 12\alpha^3 + 1 + 10\alpha)\beta +$$

$$+ (4\alpha^3 + 4 + 8\alpha + 8\alpha^2)\alpha)$$

$$c_6 = \frac{225\alpha^3\beta\gamma_1^2\gamma_2^2}{(\alpha + \beta)^4} ((12\alpha + 8)\beta^3 + (8 + 18\alpha + 12\alpha^2)\beta^2 + (4\beta^3 + 10\alpha + 4 + 4\alpha^3 + 12\alpha^2)\beta +$$

$$+ (1 + 2\alpha + 2\alpha^2)\alpha)$$

3. Обсуждение результатов

Используя модель КТ с барьером конечной высоты, Носака вычислял энергию экситонных состояний для CdS и получил сравнимые результаты с полученными другими авторами в приближении сильной связи [4]. Приведём сравнение его результатов с нашими вариационными значениями, полученными минимизацией (16) по α и β (см. Таблицу 2). Параметры расчета следующие: $m_{1i} = 0.19 m_e$, $m_{2i} = 0.80 m_e$, $\gamma_1 = 1$, $\gamma_2 = 1$, $\epsilon = 5.6$, $V_c = V_h = 3.6$ eV

Видно, что наши результаты не хуже при $R = 10$ ангстрем, и становится лучше с ростом радиуса КТ.

Параметры материалов КТ Si/SiO₂ приведены в [2,6], и сравнены с несколькими экспериментальными данными.

Таблица 2

R, Ангстрем	10	20
E_{ex} eV, Nosaka [4]	1.20	0.40
E_{ex} eV, (16)	1.27	0.29

Поскольку наша модель является однозонным с изотропной массой, мы будем учитывать непараболичность зоны проводимости простой эмпирической формулой [5]

$$m_{1i}(E_1) = m_{1i}(0)[1 + \chi E_1] \quad (17)$$

Здесь, $\chi \approx 2 \text{ eV}^{-1}$, E_1 – собственная энергия электрона в сферической яме, см.(16).

Использовали усреднённые по направлениям эффективные массы для электрона и дырок [6]: $m_{1i} = 0.258 m_e$, $m_{1o} = 1 m_e$, $m_{2i} = 0.21 m_e$, $m_{2o} = 5 m_e$, и следующие параметры для материалов КТ: $\epsilon = 10$, $V_{10} = 3.2 \text{ eV}$, $V_{20} = 4.3 \text{ eV}$. При прямой минимизации (16) для каждой пары значений α, β определяли E_1 и $m_{1i}(E_1)$ самосогласованно, т. е. итерационно с начальным значением $m_{1i}(0) = 0.258 m_e$. Результаты расчетов при сравнении с экспериментальными данными приведены на рисунке.

Вообще, при наличии кулоновского притяжения, одночастичные уровни сдвигаются. Однако, для КТ Si/SiO₂ это сдвиг мало [2,6]. Наши тесты показали, что, учет этого сдвига существенно не меняет полученных здесь результатов.

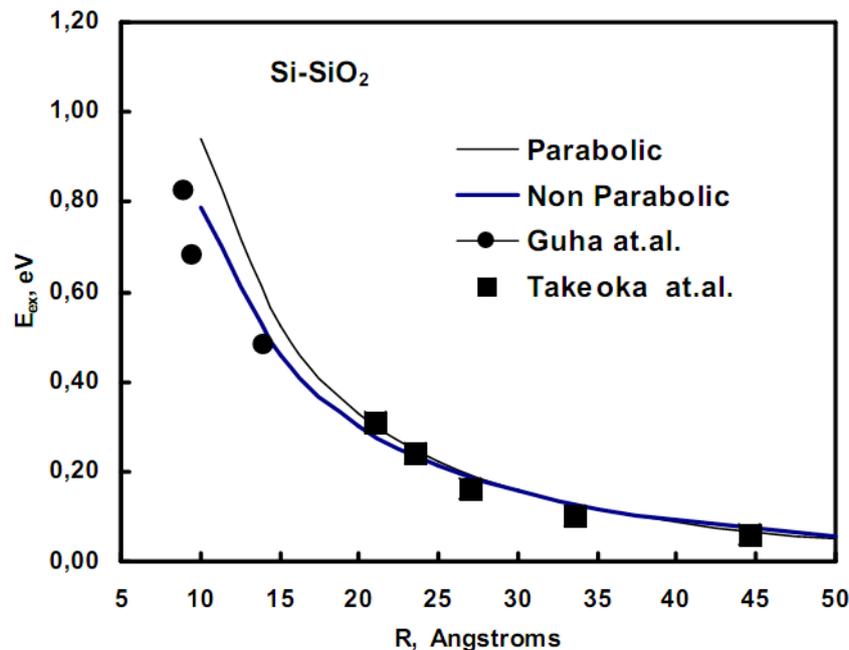


Рис. 1. Сравнение расчета с экспериментом

4. Заключение

Приведенная в настоящей работе вариационная схема расчета является достаточно простой, в конечном этапе получен алгебраический функционал для одночастичной и экситонной энергий. Показано, что структура сложной зоны может быть учтена с помощью модели Кейна. В присутствии внешних полей вариационная волновая функция для электрона и дырок могут деформироваться, что частично учитывается вариационными параметрами при минимизации полной энергии.

Если материал КТ и окружающая среда имеют различные диэлектрические проницаемости, необходимо учитывать силы электростатических изображений [2], которые в данной работе не учтены. А также предложенная схема расчета ограничена только основным состоянием экситона.

Литература:

1. L. Pavesi, L. Dal Negro, C. Mazzoleni, G. Franzo, and F. Priolo, *Nature (London)* 440,408 (2000).
2. A. S. Moskalenko, J. Berakdar, A. A. Prokofiev and I. N. Yassievich. *Phys. Rev. B* 76, 085427 (2007).
3. I. Filikhin, V. M. Suslov, M. Wu and B. Vlahovic, *Physica E* 41, 1358, (2009).
4. Y. Nosaka, *J. Phys. Chem.* 95, 5054–5058 (1991)
5. D. M. Riffe, *J. Opt. Soc. Am. B*, Vol. 19, No. 5, 1092–1100, (2002)
6. В. А. Бурдов. *ФТП* 36, 1233–1236, (2002)
7. S. Guha, B. Qadri, R. G. Musket, M. A. Wall, and T. Shimizu-Iwayama, *J. Appl. Phys.* 88, 3954 (2000).
8. S. Takeoka, M. Fujii, and S. Hayashi, *Phys. Rev. B* 62, 16820 (2000).

Демонстрация зависимости распределения интенсивности интерферируемой волны вдоль прямой от расстояния между этой прямой и отрезком, соединяющим точечные источники когерентных волн, с помощью компьютерной модели

Данилов Олег Евгеньевич, кандидат педагогических наук, доцент
Глазовский государственный педагогический институт имени В. Г. Короленко (Удмуртская Республика)

В статье рассматривается, как с помощью компьютерной модели интерференции когерентных волн от двух точечных источников, предлагаемой автором, демонстрируется зависимость интерференционной картины (распределения интенсивности результирующей волны вдоль отрезка прямой) от расстояния до источников волн.

Ключевые слова: визуализация, компьютерная визуализация, компьютерное моделирование, модель, учебная компьютерная модель, интерференция, когерентные волны, опыт Юнга.

Эта статья является логическим продолжением нашей статьи, опубликованной ранее [2], и конкретизирует некоторые результаты, представленные в других работах [3; 4; 5; 6; 13; 14; 15; 18; 19; 20]. Она наглядно демонстрирует, как с помощью компьютерного моделирования можно визуализировать учебные модели, описываемые математическими соотношениями [8; 9], дополняя их образными моделями [2; 3; 5; 6; 11] и другой графической информацией [1; 4; 7; 10; 12; 16; 17]. В предыдущей статье [2] кратко описывается методика демонстрации явления интерференции от двух точечных источников когерентных волн [3; 6; 17; 18]. В ней также приводится формула для расчета ширины максимумов интенсивности результирующей волны (рис. 1):

$$\Delta x = x_{k+1} - x_k = y\lambda/d, k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots,$$

где k — номер интерференционного максимума, y — расстояние от отрезка, соединяющего источники волн; — длина волны; d — расстояние между источниками. Выражение получено аналитически, при этом считалось, что расстояние $y \gg d$. Именно, исходя из этого, на графике зависимости интенсивности $I(x)$ интерферируемой волны максимумы интенсивности имеют одинаковую ширину. Кроме того, формула позволяет сделать вывод, согласно которому при удалении от источников ширина интерференционного максимума увеличивается пропорционально расстоянию y от картины распределения до отрезка d , соединяющего источники (коэффициент пропор-

циональности равен $/d$). Если же рассматривать картину между источниками, то вдоль отрезка, соединяющего источники, картина качественно будет такой же, какой она изображена на рис. 1 в его верхней части.

Компьютерная модель явления строилась на том основании, что точечные источники испускают когерентные гармонические волны, которые являются сферическими (фронт волны представляет собой сферу). Такая модель является более точной, в сравнении с приближением, представленным выше и согласно которому наблюдаемая картина распределения интенсивности находится очень далеко от источников волн (в этом случае волны можно было бы считать плоскими). Полученное при компьютерном моделировании распределение интенсивности интерферируемой волны на плоскости (рис. 2) позволяет обучающимся сразу увидеть, как изменяется вид распределения по мере удаления от источников волн. Для количественной оценки на экран выводится еще и распределение интенсивности результирующей волны вдоль прямой, которое расположено в верхней части окна приложения (рис. 2).

По мере удаления от источников прямой, вдоль которой получается график зависимости $I(x)$, картина распределения интенсивности вдоль этой прямой изменяется, что видно при сравнении рис. 2 и рис. 3. И чем дальше эта прямая от источников (рис. 4), тем больше распределение похоже на то, что получено аналитически (рис. 1).

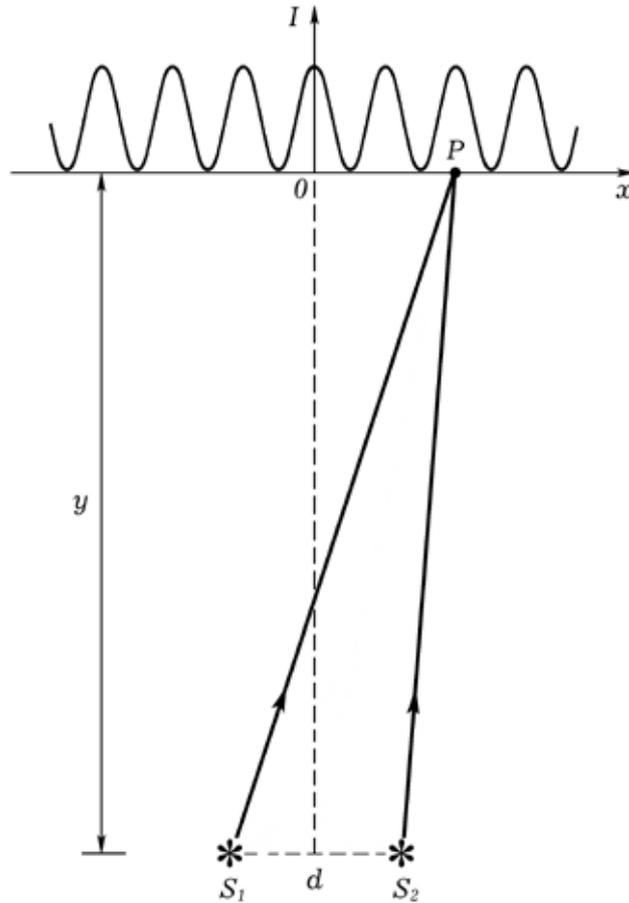


Рис. 1. Схема опыта Юнга, используемая для расчета приближенной интерференционной картины

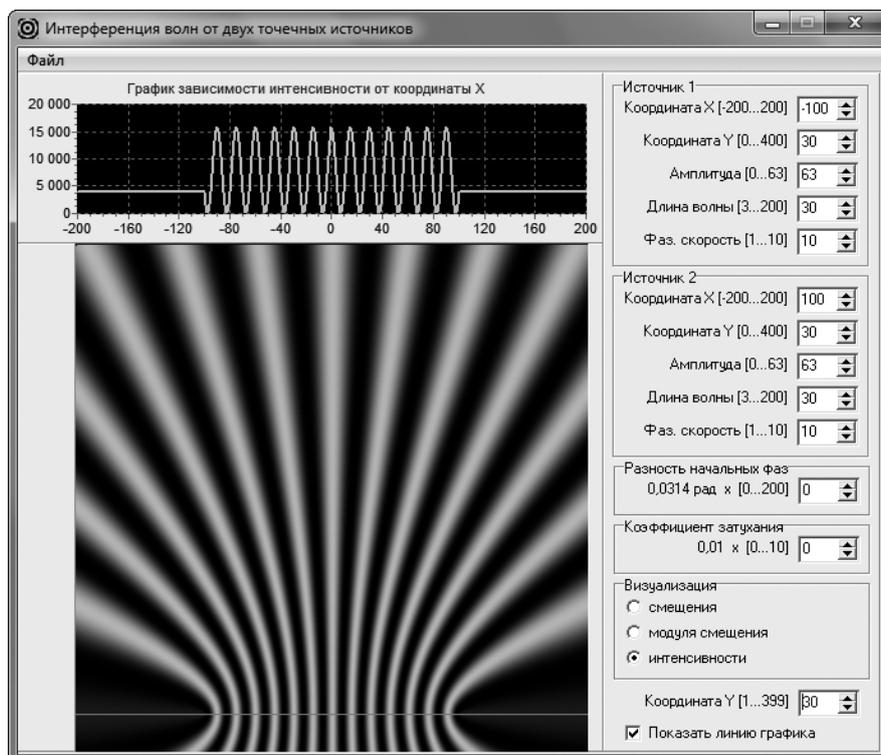


Рис. 2. Распределения интенсивности интерферируемой волны вдоль прямой, проходящей через источники волн, и на плоскости

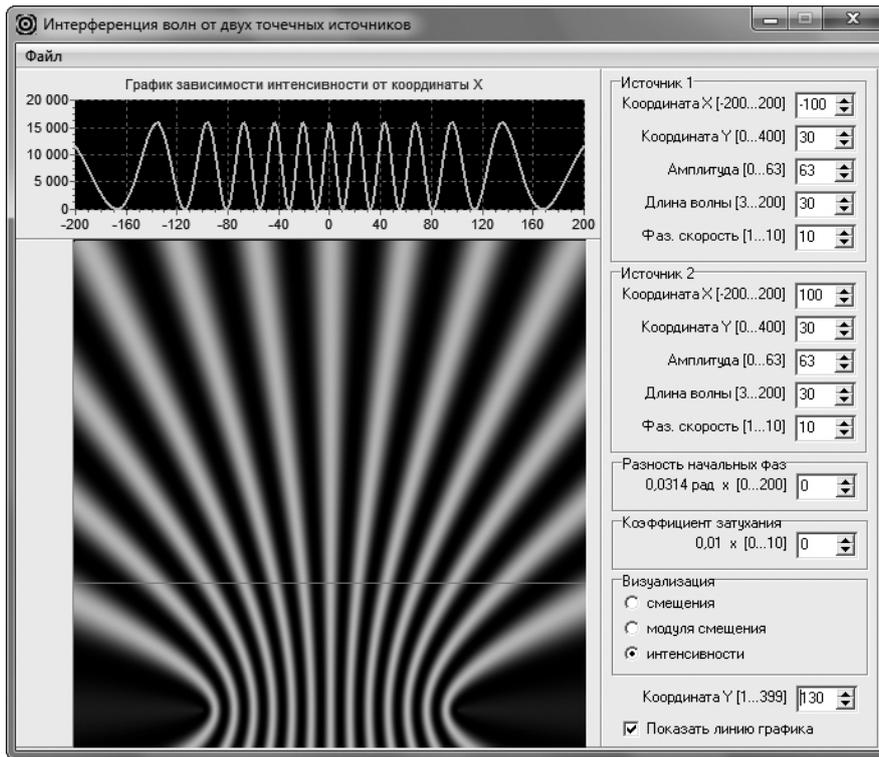


Рис. 3. Вид распределения интенсивности интерферируемой волны вдоль прямой, проходящей на некотором удалении от источников волн и параллельной прямой, проходящей через эти источники

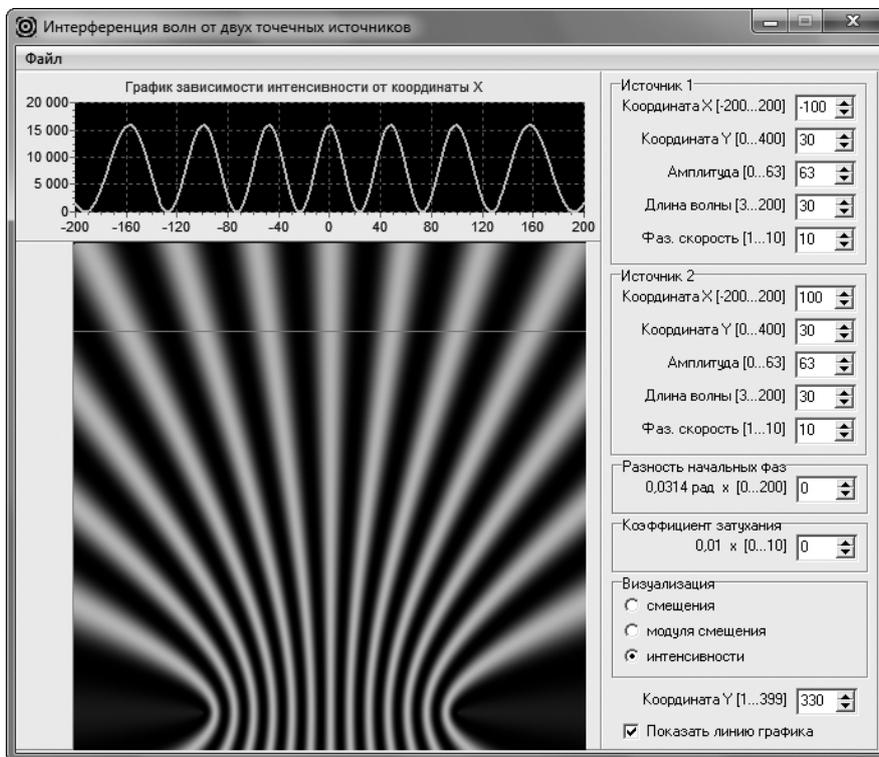


Рис. 4. Изменение вида распределения интенсивности интерферируемой волны вдоль прямой при удалении этой прямой от источников волн

Таким образом компьютерная модель демонстрирует обучающимся «приближенность» учебной теории интерференции. Рассматривая распределения, показанные на рис. 2, рис. 3 и рис. 4, можно показать учащимся увеличение ширины максимума интерференционной картины по мере удаления наблюдаемой картины от источников волн, отличное от ожидаемого согласно теории. Например, на рис. 4 расстояние от картины распределения, представленной в верхней части окна приложения, до источников в три раза больше, чем на рис. 3. Обучающиеся могут легко заметить, что ширина центрального (нулевого) максимума интенсивности на рис. 4 при этом примерно в два раза больше (а не в три, как «предсказывает» фрагмент теории, приведенный в начале статьи).

Очень важно, чтобы преподаватель сообщил обучающимся, что и компьютерная модель не является «точным отображением» реальной интерференции, так как по-

строена на математических (абстрактных) моделях. Например, интерферирующие волны являются гармоническими, испускающие их источники — точечными, а вокруг них отсутствуют какие-либо объекты. Среда, в которой распространяются волны, однородна и изотропна. Создать такие условия в реальной учебном физическом эксперименте невозможно [1; 7; 10; 12414; 16; 17]. Можно только создать условия, более или менее близкие к этим условиям (волны являются почти гармоническими; среда — почти изотропная и однородная; объекты, расположенные вокруг, влияют на результаты экспериментов незначительно, размеры источников волн малы и т. п.). Поэтому также важно, чтобы учащиеся наблюдали результаты не только вычислительного, но и соответствующего натурального учебного эксперимента, и видели различие между реальным объектом исследования и его компьютерной моделью [2; 3; 6; 18].

Литература:

1. Данилов, О. Е. Демонстрационный эксперимент по изучению звуковых полей методом компьютерного сканирования/О. Е. Данилов // Педагогика: традиции и инновации: материалы IV междунар. науч. конф. (г. Челябинск, декабрь 2013 г.). — Челябинск: Два комсомольца, 2013. — с. 209–212.
2. Данилов, О. Е. Демонстрация явления интерференции волн от двух точечных источников с помощью компьютерной модели/О. Е. Данилов // Молодой ученый. — 2014. — № 13. — с. 5–10.
3. Данилов, О. Е. Изучение интерференции с помощью компьютерного моделирования/О. Е. Данилов // Дистанционное и виртуальное обучение. — 2013. — № 9. — с. 50–58.
4. Данилов, О. Е. Использование компьютерных моделей при обучении физике/О. Е. Данилов // Проблемы школьного и дошкольного образования: Материалы III регионального науч.-практ. семинара «Достижения науки и практики — в деятельность образовательных учреждений». — Глазов: Глазов. гос. пед. ин-т, 2012. — с. 101–102.
5. Данилов, О. Е. Компьютерная визуализация распределений физических величин в пространстве/О. Е. Данилов // Молодой ученый. — 2013. — № 11. — с. 582–587.
6. Данилов, О. Е. Компьютерная модель интерференции от двух точечных источников/О. Е. Данилов // Информатика: проблемы, методология, технологии: Материалы XI Международной научно-практической конференции, Воронеж, 10–11 февраля 2011 г.: в 3 т. Т. 3. Школа-конференция «Информатика в образовании». — Воронеж: Издательско-полиграфический центр Воронежского государственного университета, 2011. — с. 87–89.
7. Данилов, О. Е. Компьютерная экспериментальная установка для сканирования полей физических величин/О. Е. Данилов // Дистанционное и виртуальное обучение. — 2014. — № 1. — с. 77–80.
8. Данилов, О. Е. Компьютерное моделирование: Волновое уравнение. Численные методы решения физических задач. Bogland Pascal. Учебно-методическое пособие/О. Е. Данилов. — Глазов: ГГПИ, 2009. — 24 с.
9. Данилов, О. Е. Компьютерное моделирование колебательного движения. Численные методы решения задач: учебно-методическое пособие/О. Е. Данилов, А. Ю. Трефилова. — Глазов: Глазов. гос. пед. ин-т, 2012. — 36 с.
10. Данилов, О. Е. Метод компьютерного сканирования полей физических величин и его применение в учебном физическом эксперименте/О. Е. Данилов // Актуальные задачи педагогики: материалы V междунар. науч. конф. (г. Чита, апрель 2014 г.). — Чита: Издательство «Молодой ученый», 2014. — с. 231–235.
11. Данилов, О. Е. Обучение компьютерному моделированию на примере создания компьютерной модели кругового математического маятника/О. Е. Данилов // Дистанционное и виртуальное обучение. — 2013. — № 10. — с. 80–87.
12. Данилов, О. Е. Педагогические исследования по доказательству эффективности применения метода компьютерного сканирования полей при обучении физике/О. Е. Данилов // Инновации в образовании. — 2014. — № 6. — с. 147–158.
13. Данилов, О. Е. Применение имитационного моделирования механических взаимодействий при обучении физике/О. Е. Данилов // Дистанционное и виртуальное обучение. — 2014. — № 5. — с. 97–103.
14. Данилов, О. Е. Принципы использования метода компьютерного сканирования полей физических величин в учебном процессе/О. Е. Данилов // Актуальные вопросы современной педагогики: материалы IV междунар. науч. конф. (г. Уфа, ноябрь 2013 г.). — Уфа: Лето, 2013. — с. 220–222.

15. Данилов, О.Е. Формирование умения проводить теоретическое исследование при изучении распределения физической величины в пространстве с помощью компьютерной модели/О.Е. Данилов // Дистанционное и виртуальное обучение. — 2013. — №7. — с. 84–94.
16. Данилов, О.Е. Экспериментальное изучение интерференции звука на зеркале Ллойда с помощью компьютерных технологий/О.Е. Данилов // Дистанционное и виртуальное обучение. — 2014. — №4. — с. 89–94.
17. Данилов, О.Е. Экспериментальное изучение явления интерференции с помощью метода сканирования полей физических величин/О.Е. Данилов // Дистанционное и виртуальное обучение. — 2013. — №11. — с. 105–115.
18. Компьютерная модель интерференции/О.Е. Данилов. — Электрон. дан. — Сайты Google, 2011. — Режим доступа: <https://sites.google.com/site/intercommod/>. — Загл. с экрана.
19. Профессиональное образование: модернизационные аспекты: коллективная монография. В 9 т. Т. 4./Р.М. Абдулгалимов, Н.А. Артеменко, С.В. Белоусов, Т.Е. Беньковская, О.М. Бородулина, О.Е. Данилов, С.И. Моднов, Т.К. Ивашковская, А.Г. Маланов, М.В. Пац, Н.В. Попова, Н.Е. Попова, Е.И. Черкашина; под ред. О.П. Чигишевой. — Ростов-н/Д: Издательство Международного исследовательского центра «Научное сотрудничество», 2014. — 267 с.
20. Danilov, O. Particular didactic principles on the use of computer visualization of the fields of physical quantities in the educational process/O. Danilov // Young Scientist USA: Education. — Lulu, 2014. — P. 29–32.

Программирование синхронного неявнополюсного дугостаторного двигателя ($Z_1 = 6$) с трехфазной обмоткой индуктора с нулевым проводом

Емельянов Александр Александрович, доцент;
 Козлов Алексей Максимович, студент;
 Бесклеткин Виктор Викторович, студент;
 Авдеев Александр Сергеевич, студент;
 Киряков Георгий Анатольевич, студент;
 Чернов Михаил Владимирович, студент;
 Габзалилов Эльвир Фиргатович, студент

Российский государственный профессионально-педагогический университет (г. Екатеринбург)

Данная работа является продолжением работы [1], в которой моделирование синхронного неявнополюсного дугостаторного двигателя (СНДД) проводилось с помощью магнитных и электрических схем замещения [2], [3]. На рис.1 показано схематичное изображение СНДД, а на рис. 2 приведена его линейная развертка и магнитная схема замещения.

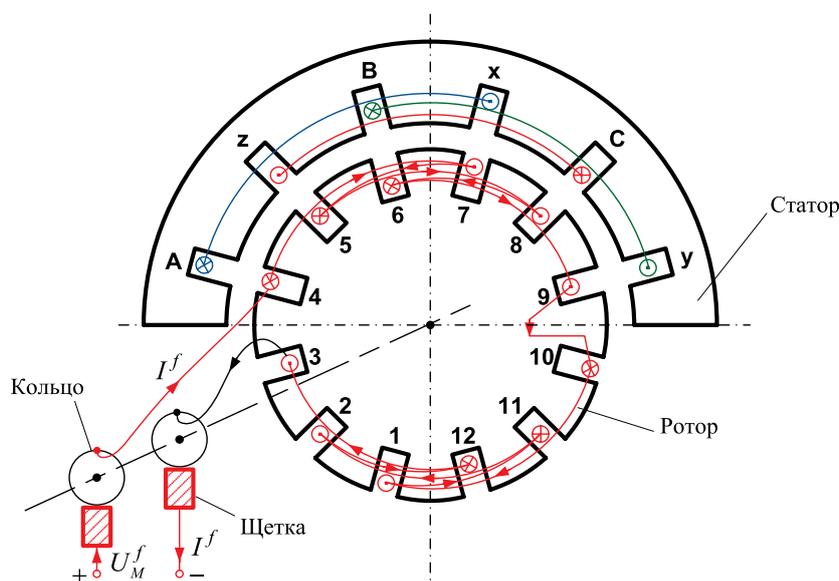


Рис. 1. Дугостаторный неявнополюсный синхронный двигатель

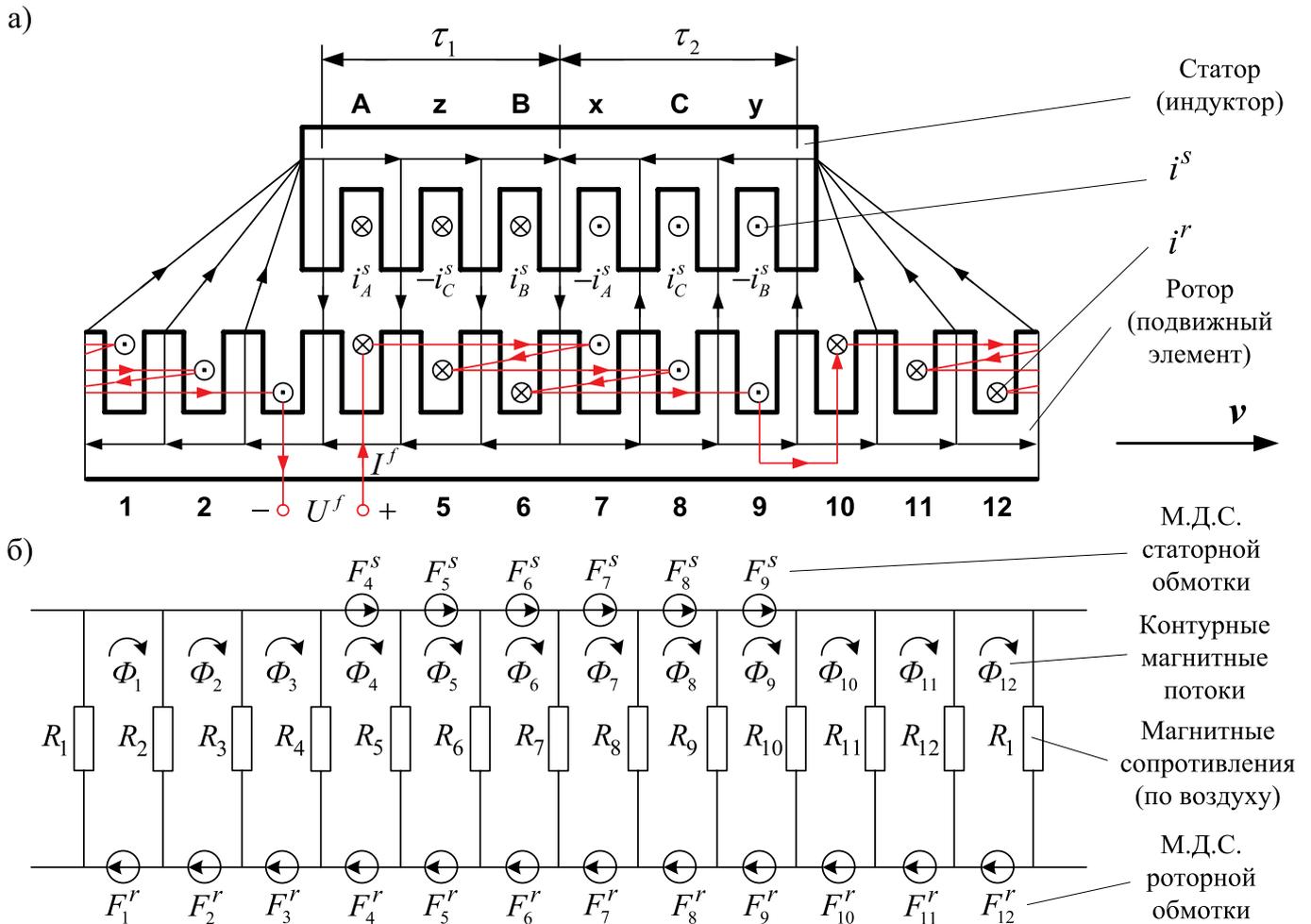


Рис. 2. а) Синхронный неявнополюсный дугостаторный двигатель ($2p = 2, Z_1 = 6$); б) Магнитная схема замещения

С целью уменьшения пульсаций усилий и искажений токов i_A^s, i_C^s, i_B^s на начальном участке пуска [1] в данной работе сделаны следующие изменения:

- напряжение постоянного тока U^f подается не скачком, а по линейному закону;
- пространственное распределение 1-й гармоники М.Д. С. обмотки возбуждения выразим через скольжение по отношению к бегущему полю потока, созданного статорной обмоткой. После втягивания ротора в синхронизм математические выражения бегущих волн М.Д. С. будут такими же, как и в предыдущей работе [1].

Так как работа адресована студентам, то для лучшего овладения материалом основные выводы математических формул повторим в данной работе.

Запишем основные уравнения для « n »-го участка схемы замещения.

Баланс магнитных напряжений магнитной цепи

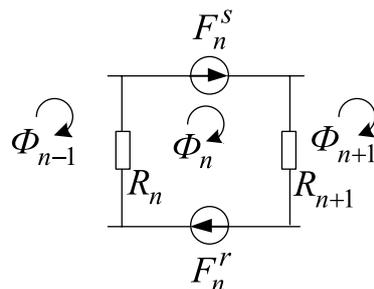


Рис. 3. Магнитная схема замещения « n »-го участка

$\Phi_{n-1}, \Phi_n, \Phi_{n+1}$ — контурные магнитные потоки;

R_n, R_{n+1} – магнитные сопротивления воздушных участков;

$F_n^S = \omega_n^S \cdot i_n^S$ – магнитодвижущая сила, созданная статорным током i_n^S , протекающим по всем проводникам паза (ω_n^S);

$F_n^r = \omega_n^r \cdot i_n^r + \omega_n^r \cdot I_n^f$ – М.Д.С. тока в обмотке ротора;

$F_n^S = 0$ – в шунтирующих зонах.

Баланс М.Д.С. для « n »-го участка имеет следующий вид:

$$F_n^S + F_n^r = \Phi_n \cdot (R_{n+1} + R_n) - \Phi_{n+1} \cdot R_{n+1} - \Phi_{n-1} \cdot R_n,$$

где $F_n^r = F_n^{r \text{ асинхр.}} + F_n^{f \text{ синхр.}} = \underbrace{\omega_n^r \cdot i_n^r}_{\text{асинхр.}} + \underbrace{\omega_n^r \cdot I_n^f}_{\text{синхр.}}$.

$$\omega_n^S \cdot i_n^S + \omega_n^r \cdot i_n^r + \omega_n^r \cdot I_n^f = -\Phi_{n-1} \cdot R_n + \Phi_n \cdot (R_{n+1} + R_n) - \Phi_{n+1} \cdot R_{n+1}.$$

Ток i_n^r условно назовем асинхронной составляющей полного тока в роторной обмотке. Этот ток создается от Э.Д.С. трансформации, Э.Д.С. движения, от изменяющегося потока во времени или от движущего потока в пространстве. При построении обобщенной математической модели двигателей, исключая вторую составляющую М.Д.С. ($F_n^{f \text{ синхр.}}$) с помощью соответствующих ключей, можно перейти к линейным (дугостаторным) асинхронным двигателям [4], [5], ..., [9].

Вторая составляющая М.Д.С. (условно назовем синхронная составляющая $F_n^{f \text{ синхр.}}$) представляет собой бегущую в пространстве ступенчатую фигуру в соответствии с дискретным расположением роторной обмотки.

В данной работе синхронную составляющую выразим 1-й гармоникой бегущей волны:

$$F_n^{f \text{ синхр.}} = \omega_n^r \cdot I_M^f \cdot \sin \left((1-s) \cdot \omega \cdot t - \left(\frac{\pi}{\tau} \cdot t_z \cdot n + w12 \cdot \frac{\pi}{6} \right) \right),$$

где $\tau = 3 \cdot t_z$ - полюсное деление;

$s = \frac{vs - v_{k-1}}{vs}$ - скольжение на начальном участке пуска до входа в синхронизм;

$vs = 2 \cdot \tau \cdot f$ - синхронная скорость бегущего поля.

Отсюда асинхронная составляющая тока в обмотке ротора определится по следующему выражению:

$$i_{n,k}^r = -\frac{\omega_n^S}{\omega_n^r} \cdot i_{n,k}^S - \frac{R_n}{\omega_n^r} \cdot \Phi_{n-1,k} + \frac{R_n + R_{n+1}}{\omega_n^r} \cdot \Phi_{n,k} - \frac{R_{n+1}}{\omega_n^r} \cdot \Phi_{n+1,k} - I_{n,k}^f. \quad (1)$$

Уравнение баланса напряжений электрической цепи ротора для асинхронной составляющей тока ротора

$$r^r \cdot i_n^r + L^r \cdot \frac{\partial i_n^r}{\partial t} + L^r \cdot v_{k-1} \cdot \frac{\partial i_n^r}{\partial x} = -\omega_n^r \cdot \frac{\partial \Phi_n}{\partial t} - \omega_n^r \cdot v_{k-1} \cdot \frac{\partial \Phi_n}{\partial x}. \quad (2)$$

Выразим производные во времени через конечные разности:

$$\frac{\partial i_n^r}{\partial t} = \frac{i_{n,k}^r - i_{n,k-1}^r}{\Delta t}, \quad \frac{\partial \Phi_n}{\partial t} = \frac{\Phi_{n,k} - \Phi_{n,k-1}}{\Delta t},$$

где n – номер зубцового деления;

k – номер шага разбиения по времени.

В формуле (2) линейную скорость ротора принимаем равной $v = v_{k-1}$ и в пределах « k » интервала считается постоянным.

Производные по пространственной координате « x » выразим через центральные конечные разности:

$$\frac{\partial i_{n,k}^r}{\partial x} = \frac{i_{n+1,k}^r - i_{n-1,k}^r}{2 \cdot t_z}, \quad \frac{\partial \Phi_{n,k}}{\partial x} = \frac{\Phi_{n+1,k} - \Phi_{n-1,k}}{2 \cdot t_z}.$$

С учетом вышеприведенных замечаний уравнение (2) примет следующий вид:

$$\begin{aligned}
 r^r \cdot i_{n,k}^r + L^r \cdot \frac{i_{n,k}^r - i_{n,k-1}^r}{\Delta t} + L^r \cdot v_{k-1} \cdot \frac{i_{n+1,k}^r - i_{n-1,k}^r}{2 \cdot t_z} = \\
 = -\omega_n^r \cdot \frac{\Phi_{n,k} - \Phi_{n,k-1}}{\Delta t} - \omega_n^r \cdot v_{k-1} \cdot \frac{\Phi_{n+1,k} - \Phi_{n-1,k}}{2 \cdot t_z}.
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

Исключим из уравнения (3) асинхронную составляющую тока в роторе. Для этого подставим выражение (1) в уравнение (3) и получим:

$$\begin{aligned}
 \left[\omega_n^s \cdot \frac{L^r \cdot v_{k-1}}{\omega_n^r 2t_z} \right] \cdot i_{n-1,k}^s + \left[-\omega_n^s \cdot \left(r^r + \frac{L^r}{\Delta t} \right) \cdot \frac{1}{\omega_n^r} \right] \cdot i_{n,k}^s + \left[-\omega_n^s \cdot \frac{L^r \cdot v_{k-1}}{\omega_n^r 2t_z} \right] \cdot i_{n+1,k}^s + \\
 + \left[R_{n-1} \cdot \frac{L^r \cdot v_{k-1}}{\omega_n^r 2t_z} \right] \cdot \Phi_{n-2,k} + \left[-\frac{R_n}{\omega_n^r} \cdot \left(r^r + \frac{L^r}{\Delta t} \right) - \left(\left(\frac{R_n + R_{n-1}}{\omega_n^r} \right) \cdot L^r + \omega_n^r \right) \cdot \frac{v_{k-1}}{\omega_n^r 2t_z} \right] \cdot \Phi_{n-1,k} + \\
 + \left[\left(\frac{R_{n+1} + R_n}{\omega_n^r} \right) \cdot \left(r^r + \frac{L^r}{\Delta t} \right) + \left(\frac{R_n - R_{n+1}}{\omega_n^r} \right) \cdot \frac{L^r \cdot v_{k-1}}{2t_z} + \frac{\omega_n^r}{\Delta t} \right] \cdot \Phi_{n,k} + \\
 + \left[-\frac{R_{n+1}}{\omega_n^r} \cdot \left(r^r + \frac{L^r}{\Delta t} \right) + \left(\left(\frac{R_{n+2} + R_{n+1}}{\omega_n^r} \right) \cdot L^r + \omega_n^r \right) \cdot \frac{v_{k-1}}{2t_z} \right] \cdot \Phi_{n+1,k} + \left[-\frac{R_{n+2}}{\omega_n^r} \cdot \frac{L^r \cdot v_{k-1}}{2t_z} \right] \cdot \Phi_{n+2,k} + \\
 + \left[\frac{L^r \cdot v_{k-1}}{2t_z} \right] \cdot I_{n-1,k}^f + \left[-\left(r^r + \frac{L^r}{\Delta t} \right) \right] \cdot I_{n,k}^f + \left[-\frac{L^r \cdot v_{k-1}}{2t_z} \right] \cdot I_{n+1,k}^f = \\
 = \left(-\frac{\omega_n^s}{\omega_n^r} \cdot \frac{L^r}{\Delta t} \right) \cdot i_{n,k-1}^s + \left(-\frac{R_n}{\omega_n^r} \cdot \frac{L^r}{\Delta t} \right) \cdot \Phi_{n-1,k-1} + \left(\frac{(R_{n+1} + R_n) \cdot L^r + (\omega_n^r)^2}{\omega_n^r \cdot \Delta t} \right) \cdot \Phi_{n,k-1} + \\
 + \left(-\frac{R_{n+1}}{\omega_n^r} \cdot \frac{L^r}{\Delta t} \right) \cdot \Phi_{n+1,k-1} + \left(-\frac{L^r}{\Delta t} \right) \cdot I_{n,k-1}^f.
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

Это уравнение может быть реализовано при произведении матрицы **A**, элементы которой записаны в квадратных скобках, на матрицу-столбец **X**, состоящей из потоков (Φ) и токов статорной обмотки. Правая часть уравнения (4) формирует первые двенадцать элементов матрицы-столбца свободных членов **S** в $(k-1)$ момент времени. Элементы 13, 14 и 15 строк матрицы **A** и соответствующие элементы s_{13} , s_{14} и s_{15} будут сформированы из баланса напряжений статорной обмотки.

Наконец, последние элементы матриц **A** и **S** определяются из баланса токов в трехфазной обмотке соединенной в звезду с нулевым проводом. Матрица-столбец **X** сформирована из первых двенадцати элементов, соответствующих потокам Φ_1, \dots, Φ_{12} , а остальные – токам статорной обмотки i_A^s, i_C^s, i_B^s и i_0^s .

Общий вид матриц при числе полюсов $2p = 2$ и общем числе пазов индуктора (статора) $Z_1 = 6$ приведен на рис. 4.

Введем следующие обозначения:

$$N1 = \frac{L^r \cdot v_{k-1}}{\omega_n^r \cdot 2t_z}; \quad N2 = \frac{1}{\omega_n^r} \cdot \left(r^r + \frac{L^r}{\Delta t} \right); \quad N3 = \frac{\omega_n^r}{\Delta t}; \quad N4 = \frac{L^r}{\omega_n^r \cdot \Delta t}; \quad N5 = \frac{(\omega_n^r)^2}{L^r}.$$

– Магнитные сопротивления в шунтирующих зонах:

$$R_1 = 500 \cdot R_\delta;$$

$$R_2 = R_{12} = 50 \cdot R_\delta;$$

$$R_3 = R_{11} = 5 \cdot R_\delta.$$

– Магнитные сопротивления в индукторной зоне:

$$R_4 = R_5 = \dots = R_{10} = R_\delta.$$

– Элементы матрицы **A**, перемножаемые на потоки матрицы-столбца **X**:

$$B = 2R_\sigma \cdot N2 + N3;$$

$$B_1 = (5R_\sigma + R_\sigma) \cdot N2 + (R_\sigma - 5R_\sigma) \cdot N1 + N3 = 6R_\sigma \cdot N2 + (-4R_\sigma) \cdot N1 + N3;$$

$$B_2 = 55R_\sigma \cdot N2 + (-45R_\sigma) \cdot N1 + N3;$$

$$B_3 = 550R_\sigma \cdot N2 + (-450R_\sigma) \cdot N1 + N3;$$

$$\begin{aligned}
 B_5 &= 550R_\sigma \cdot N2 + 450R_\sigma \cdot N1 + N3; \\
 B_6 &= 55R_\sigma \cdot N2 + 45R_\sigma \cdot N1 + N3; \\
 B_7 &= 6R_\sigma \cdot N2 + 4R_\sigma \cdot N1 + N3; \\
 C &= (-R_\sigma) \cdot N2 + (2R_\sigma + N5) \cdot N1; \\
 C_1 &= (-R_\sigma) \cdot N2 + (6R_\sigma + N5) \cdot N1; \\
 C_2 &= (-5R_\sigma) \cdot N2 + (55R_\sigma + N5) \cdot N1; \\
 C_3 &= (-50R_\sigma) \cdot N2 + (550R_\sigma + N5) \cdot N1; \\
 C_5 &= (-500R_\sigma) \cdot N2 + (550R_\sigma + N5) \cdot N1; \\
 C_6 &= (-50R_\sigma) \cdot N2 + (55R_\sigma + N5) \cdot N1; \\
 C_7 &= (-5R_\sigma) \cdot N2 + (6R_\sigma + N5) \cdot N1; \\
 E &= -R_\sigma \cdot N2 - (2R_\sigma + N5) \cdot N1; \\
 E_1 &= -5R_\sigma \cdot N2 - (6R_\sigma + N5) \cdot N1; \\
 E_2 &= -50R_\sigma \cdot N2 - (55R_\sigma + N5) \cdot N1; \\
 E_3 &= -500R_\sigma \cdot N2 - (550R_\sigma + N5) \cdot N1; \\
 E_5 &= -50R_\sigma \cdot N2 - (550R_\sigma + N5) \cdot N1; \\
 E_6 &= -5R_\sigma \cdot N2 - (55R_\sigma + N5) \cdot N1; \\
 E_7 &= -R_\sigma \cdot N2 - (6R_\sigma + N5) \cdot N1; \\
 D &= -R_\sigma \cdot N1; \quad D_1 = 5 \cdot D; \quad D_2 = 50 \cdot D; \quad D_3 = 500 \cdot D.
 \end{aligned}$$

– Элементы матрицы **A**, перемножаемые на токи матрицы **X**:

$$T = -\omega_n^S \cdot N1;$$

$$Y = -\omega_n^S \cdot N2;$$

– Элементы матрицы-столбца свободных членов **S**:

$$W1 = -\omega_n^S \cdot N4;$$

$$P = -R_\sigma \cdot N4;$$

$$Q = 2R_\sigma \cdot N4 + N3;$$

$$Q_1 = 6R_\sigma \cdot N4 + N3; \quad Q_2 = 55R_\sigma \cdot N4 + N3; \quad Q_3 = 550R_\sigma \cdot N4 + N3;$$

$$I_{n,k}^f = I_{\max}^f \cdot \sin \left((1-s) \cdot 2\pi \cdot f \cdot (k \cdot dt) - \left(\frac{\pi}{\tau} \cdot t_Z \cdot n + \omega 12 \cdot \frac{\pi}{6} \right) \right);$$

$$I_{n,k-1}^f = I_{\max}^f \cdot \sin \left((1-s) \cdot 2\pi \cdot f \cdot ((k-1) \cdot dt) - \left(\frac{\pi}{\tau} \cdot t_Z \cdot n + \omega 12 \cdot \frac{\pi}{6} \right) \right).$$

Уравнение (4) позволит определить для первых двенадцати строк элементы матрицы **A** и с первый по двенадцатый элементы матрицы-столбца **S**, для этого последовательно зададимся n :

$$n = 1.$$

$$\begin{aligned}
 &\underbrace{[-D_2]}_{a_{1,11}} \cdot \underbrace{\Phi_{11,k}}_{x_{11}} + \underbrace{[E_3]}_{a_{1,12}} \cdot \underbrace{\Phi_{12,k}}_{x_{12}} + \underbrace{[B_5]}_{a_{1,1}} \cdot \underbrace{\Phi_{1,k}}_{x_1} + \underbrace{[C_6]}_{a_{1,2}} \cdot \underbrace{\Phi_{2,k}}_{x_2} + \underbrace{[D_1]}_{a_{1,3}} \cdot \underbrace{\Phi_{3,k}}_{x_3} = \\
 &= \underbrace{Q_3 \cdot \Phi_{1,k-1} + P \cdot (500 \cdot \Phi_{12,k-1} + 50 \cdot \Phi_{2,k-1}) + \omega_n^r \cdot (N2 \cdot I_{1,k}^f + N1 \cdot (I_{2,k}^f - I_{12,k}^f) - N4 \cdot I_{1,k-1}^f)}_{S_1}.
 \end{aligned}$$

Запишем элементы матрицы **A**:

$$a_{1,11} = -D_2; \quad a_{1,12} = E_3; \quad a_{1,1} = B_5; \quad a_{1,2} = C_6; \quad a_{1,3} = D_1.$$

В правой части сформирован элемент s_1 матрицы-столбца \mathbf{S} :

$$s_1 = Q_3 \cdot x_{1,k-1} + P \cdot (500 \cdot x_{12,k-1} + 50 \cdot x_{2,k-1}) + \omega_n^r \cdot (N2 \cdot I_{1,k}^f + N1 \cdot (I_{2,k}^f - I_{12,k}^f) - N4 \cdot I_{1,k-1}^f).$$

Примечание: вначале матрица \mathbf{A} предстанет «пустой» и после каждой операции $n = \dots$ определятся постепенно элементы для каждой строки и только в конце всех операций матрица \mathbf{A} предстанет перед читателем в том виде как она дана на рис. 4. Но эта «пустая» матрица \mathbf{A} уже должна быть подготовлена. Эта «пустая» форма направляет, выступает «организующим началом» по поиску элементов в каждой строке.

При $n = 1$, как было показано выше, определились элементы первой строки. Найденные коэффициенты вписываются в матрицу \mathbf{A} . В дальнейшем становится понятным алгоритм заполнения матрицы.

$n = 2$.

$$\begin{aligned} & \underbrace{\left[\begin{matrix} [-D_3] \cdot \Phi_{12,k} \\ a_{2,12} & x_{12} \end{matrix} \right]} + \underbrace{\left[\begin{matrix} [E_5] \cdot \Phi_{1,k} \\ a_{2,1} & x_1 \end{matrix} \right]} + \underbrace{\left[\begin{matrix} [B_6] \cdot \Phi_{2,k} \\ a_{2,2} & x_2 \end{matrix} \right]} + \underbrace{\left[\begin{matrix} [C_7] \cdot \Phi_{3,k} \\ a_{2,3} & x_3 \end{matrix} \right]} + \underbrace{\left[\begin{matrix} [D] \cdot \Phi_{4,k} \\ a_{2,4} & x_4 \end{matrix} \right]} = \\ & = \underbrace{Q_2 \cdot \Phi_{2,k-1} + P \cdot (50 \cdot \Phi_{1,k-1} + 5 \cdot \Phi_{3,k-1}) + \omega_n^r \cdot (N2 \cdot I_{2,k}^f + N1 \cdot (I_{3,k}^f - I_{1,k}^f) - N4 \cdot I_{2,k-1}^f)}_{s_2}. \end{aligned}$$

$$a_{2,12} = -D_3; \quad a_{2,1} = E_5; \quad a_{2,2} = B_6; \quad a_{2,3} = C_7; \quad a_{2,4} = D.$$

$$s_2 = Q_2 \cdot x_{2,k-1} + P \cdot (50 \cdot x_{1,k-1} + 5 \cdot x_{3,k-1}) + \omega_n^r \cdot (N2 \cdot I_{2,k}^f + N1 \cdot (I_{3,k}^f - I_{1,k}^f) - N4 \cdot I_{2,k-1}^f).$$

$n = 3$.

$$\begin{aligned} & \underbrace{\left[\begin{matrix} [T] \cdot i_{A,k}^s \\ a_{3,13} & x_{13} \end{matrix} \right]} + \underbrace{\left[\begin{matrix} [-D_2] \cdot \Phi_{1,k} \\ a_{3,1} & x_1 \end{matrix} \right]} + \underbrace{\left[\begin{matrix} [E_6] \cdot \Phi_{2,k} \\ a_{3,2} & x_2 \end{matrix} \right]} + \underbrace{\left[\begin{matrix} [B_7] \cdot \Phi_{3,k} \\ a_{3,3} & x_3 \end{matrix} \right]} + \underbrace{\left[\begin{matrix} [C] \cdot \Phi_{4,k} \\ a_{3,4} & x_4 \end{matrix} \right]} + \underbrace{\left[\begin{matrix} [D] \cdot \Phi_{5,k} \\ a_{3,5} & x_5 \end{matrix} \right]} = \\ & = \underbrace{Q_1 \cdot \Phi_{3,k-1} + P \cdot (5 \cdot \Phi_{2,k-1} + \Phi_{4,k-1}) + \omega_n^r \cdot (N2 \cdot I_{3,k}^f + N1 \cdot (I_{4,k}^f - I_{2,k}^f) - N4 \cdot I_{3,k-1}^f)}_{s_3}. \end{aligned}$$

$$a_{3,1} = -D_2; \quad a_{3,2} = E_6; \quad a_{3,3} = B_7; \quad a_{3,4} = C; \quad a_{3,5} = D; \quad a_{3,13} = T.$$

$$s_3 = Q_1 \cdot x_{3,k-1} + P \cdot (5 \cdot x_{2,k-1} + x_{4,k-1}) + \omega_n^r \cdot (N2 \cdot I_{3,k}^f + N1 \cdot (I_{4,k}^f - I_{2,k}^f) - N4 \cdot I_{3,k-1}^f).$$

Примечание: при подстановке в уравнение (4) $n = 4$, мы увидим в соответствии с рис. 1, что войдет ток i_C^S с отрицательным знаком, в то же время в матрице-столбце \mathbf{X} нет знака «-», поэтому его необходимо учесть в соответствующем элементе матрицы \mathbf{A} .

Аналогично для других фаз, в концах обмоток x, y, z условно принимаем знак «-» и этот знак вводим в соответствующие элементы матрицы \mathbf{A} .

$n = 4$.

$$\begin{aligned} & \underbrace{\left[\begin{matrix} [Y] \cdot i_{A,k}^s \\ a_{4,13} & x_{13} \end{matrix} \right]} + \underbrace{\left[\begin{matrix} [T \cdot (-1)] \cdot i_{C,k}^s \\ a_{4,14} & x_{14} \end{matrix} \right]} + \underbrace{\left[\begin{matrix} [-D_1] \cdot \Phi_{2,k} \\ a_{4,2} & x_2 \end{matrix} \right]} + \underbrace{\left[\begin{matrix} [E_7] \cdot \Phi_{3,k} \\ a_{4,3} & x_3 \end{matrix} \right]} + \underbrace{\left[\begin{matrix} [B] \cdot \Phi_{4,k} \\ a_{4,4} & x_4 \end{matrix} \right]} + \underbrace{\left[\begin{matrix} [C] \cdot \Phi_{5,k} \\ a_{4,5} & x_5 \end{matrix} \right]} + \underbrace{\left[\begin{matrix} [D] \cdot \Phi_{6,k} \\ a_{4,6} & x_6 \end{matrix} \right]} = \\ & = \underbrace{W1 \cdot i_{A,k-1}^s + Q \cdot \Phi_{4,k-1} + P \cdot (\Phi_{3,k-1} + \Phi_{5,k-1}) + \omega_n^r \cdot (N2 \cdot I_{4,k}^f + N1 \cdot (I_{5,k}^f - I_{3,k}^f) - N4 \cdot I_{4,k-1}^f)}_{s_4}. \end{aligned}$$

$$a_{4,2} = -D_1; \quad a_{4,3} = E_7; \quad a_{4,4} = B; \quad a_{4,5} = C; \quad a_{4,6} = D; \quad a_{4,13} = Y; \quad a_{4,14} = T \cdot (-1) = -T.$$

$$s_4 = W1 \cdot x_{13,k-1} + Q \cdot x_{4,k-1} + P \cdot (x_{3,k-1} + x_{5,k-1}) + \omega_n^r \cdot (N2 \cdot I_{4,k}^f + N1 \cdot (I_{5,k}^f - I_{3,k}^f) - N4 \cdot I_{4,k-1}^f).$$

$n = 5$.

$$\begin{aligned} & \underbrace{\left[\begin{matrix} [-T] \cdot i_{A,k}^s \\ a_{5,13} & x_{13} \end{matrix} \right]} + \underbrace{\left[\begin{matrix} [Y \cdot (-1)] \cdot i_{C,k}^s \\ a_{5,14} & x_{14} \end{matrix} \right]} + \underbrace{\left[\begin{matrix} [T] \cdot i_{B,k}^s \\ a_{5,15} & x_{15} \end{matrix} \right]} + \underbrace{\left[\begin{matrix} [-D] \cdot \Phi_{3,k} \\ a_{5,3} & x_3 \end{matrix} \right]} + \underbrace{\left[\begin{matrix} [E] \cdot \Phi_{4,k} \\ a_{5,4} & x_4 \end{matrix} \right]} + \underbrace{\left[\begin{matrix} [B] \cdot \Phi_{5,k} \\ a_{5,5} & x_5 \end{matrix} \right]} + \underbrace{\left[\begin{matrix} [C] \cdot \Phi_{6,k} \\ a_{5,6} & x_6 \end{matrix} \right]} + \\ & + \underbrace{\left[\begin{matrix} [D] \cdot \Phi_{7,k} \\ a_{5,7} & x_7 \end{matrix} \right]} = \underbrace{-W1 \cdot i_{C,k-1}^s + Q \cdot \Phi_{5,k-1} + P \cdot (\Phi_{4,k-1} + \Phi_{6,k-1}) + \omega_n^r \cdot (N2 \cdot I_{5,k}^f + N1 \cdot (I_{6,k}^f - I_{4,k}^f) - N4 \cdot I_{5,k-1}^f)}_{s_5}. \end{aligned}$$

$$a_{5,3} = -D; \quad a_{5,4} = E; \quad a_{5,5} = B; \quad a_{5,6} = C; \quad a_{5,7} = D; \quad a_{5,13} = -T;$$

Матрица А																X	S
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16		
$a_{1,1}$	$a_{1,2}$	$a_{1,3}$								$a_{1,11}$	$a_{1,12}$					$x_1 = \Phi_1$	s_1
$a_{2,1}$	$a_{2,2}$	$a_{2,3}$	$a_{2,4}$								$a_{2,12}$					$x_2 = \Phi_2$	s_2
$a_{3,1}$	$a_{3,2}$	$a_{3,3}$	$a_{3,4}$	$a_{3,5}$								$a_{3,13}$				$x_3 = \Phi_3$	s_3
	$a_{4,2}$	$a_{4,3}$	$a_{4,4}$	$a_{4,5}$	$a_{4,6}$							$a_{4,13}$	$a_{4,14}$			$x_4 = \Phi_4$	s_4
		$a_{5,3}$	$a_{5,4}$	$a_{5,5}$	$a_{5,6}$	$a_{5,7}$						$a_{5,13}$	$a_{5,14}$	$a_{5,15}$		$x_5 = \Phi_5$	s_5
			$a_{6,4}$	$a_{6,5}$	$a_{6,6}$	$a_{6,7}$	$a_{6,8}$					$a_{6,13}$	$a_{6,14}$	$a_{6,15}$		$x_6 = \Phi_6$	s_6
				$a_{7,5}$	$a_{7,6}$	$a_{7,7}$	$a_{7,8}$	$a_{7,9}$				$a_{7,13}$	$a_{7,14}$	$a_{7,15}$		$x_7 = \Phi_7$	s_7
					$a_{8,6}$	$a_{8,7}$	$a_{8,8}$	$a_{8,9}$	$a_{8,10}$			$a_{8,13}$	$a_{8,14}$	$a_{8,15}$		$x_8 = \Phi_8$	s_8
						$a_{9,7}$	$a_{9,8}$	$a_{9,9}$	$a_{9,10}$	$a_{9,11}$			$a_{9,14}$	$a_{9,15}$		$x_9 = \Phi_9$	s_9
							$a_{10,8}$	$a_{10,9}$	$a_{10,10}$	$a_{10,11}$	$a_{10,12}$			$a_{10,15}$		$x_{10} = \Phi_{10}$	s_{10}
	$a_{11,1}$							$a_{11,9}$	$a_{11,10}$	$a_{11,11}$	$a_{11,12}$					$x_{11} = \Phi_{11}$	s_{11}
	$a_{12,1}$	$a_{12,2}$							$a_{12,10}$	$a_{12,11}$	$a_{12,12}$					$x_{12} = \Phi_{12}$	s_{12}
			$a_{13,4}$			$a_{13,7}$						$a_{13,13}$				$x_{13} = i_A S$	s_{13}
					$a_{14,6}$			$a_{14,9}$					$a_{14,15}$			$x_{14} = i_C S$	s_{14}
				$a_{15,5}$			$a_{15,8}$						$a_{15,14}$			$x_{15} = i_B S$	s_{15}
												$a_{16,13}$	$a_{16,14}$	$a_{16,15}$	$a_{16,16}$	$x_{16} = i_0 S$	s_{16}

×

=

Рис. 4. Общий вид матриц А, Х и S.

$$a_{5,14} = Y \cdot (-1) = -Y; \quad a_{5,15} = T.$$

$$s_5 = -W1 \cdot x_{14,k-1} + Q \cdot x_{5,k-1} + P \cdot (x_{4,k-1} + x_{6,k-1}) + \omega_n^r \cdot (N2 \cdot I_{5,k}^f + N1 \cdot (I_{6,k}^f - I_{4,k}^f) - N4 \cdot I_{5,k-1}^f).$$

$n = 6.$

$$\begin{aligned} & \underbrace{[-T \cdot (-1)]}_{a_{6,14}} \cdot \underbrace{i_{C,k}^s}_{x_{14}} + \underbrace{[Y]}_{a_{6,15}} \cdot \underbrace{i_{B,k}^s}_{x_{15}} + \underbrace{[T \cdot (-1)]}_{a_{6,13}} \cdot \underbrace{i_{A,k}^s}_{x_{13}} + \underbrace{[-D]}_{a_{6,4}} \cdot \underbrace{\Phi_{4,k}}_{x_4} + \\ & + \underbrace{[E]}_{a_{6,5}} \cdot \underbrace{\Phi_{5,k}}_{x_5} + \underbrace{[B]}_{a_{6,6}} \cdot \underbrace{\Phi_{6,k}}_{x_6} + \underbrace{[C]}_{a_{6,7}} \cdot \underbrace{\Phi_{7,k}}_{x_7} + \underbrace{[D]}_{a_{6,8}} \cdot \underbrace{\Phi_{8,k}}_{x_8} = \\ & = \underbrace{W1 \cdot i_{B,k-1}^s + Q \cdot \Phi_{6,k-1} + P \cdot (\Phi_{5,k-1} + \Phi_{7,k-1}) + \omega_n^r \cdot (N2 \cdot I_{6,k}^f + N1 \cdot (I_{7,k}^f - I_{5,k}^f) - N4 \cdot I_{6,k-1}^f)}_{S_6}. \end{aligned}$$

$$a_{6,4} = -D; \quad a_{6,5} = E; \quad a_{6,6} = B; \quad a_{6,7} = C; \quad a_{6,8} = D; \quad a_{6,13} = T \cdot (-1) = -T;$$

$$a_{6,14} = -T \cdot (-1) = T; \quad a_{6,15} = Y.$$

$$s_6 = W1 \cdot x_{15,k-1} + Q \cdot x_{6,k-1} + P \cdot (x_{5,k-1} + x_{7,k-1}) + \omega_n^r \cdot (N2 \cdot I_{6,k}^f + N1 \cdot (I_{7,k}^f - I_{5,k}^f) - N4 \cdot I_{6,k-1}^f).$$

$n = 7.$

$$\begin{aligned} & \underbrace{[-T]}_{a_{7,15}} \cdot \underbrace{i_{B,k}^s}_{x_{15}} + \underbrace{[Y \cdot (-1)]}_{a_{7,13}} \cdot \underbrace{i_{A,k}^s}_{x_{13}} + \underbrace{[T]}_{a_{7,14}} \cdot \underbrace{i_{C,k}^s}_{x_{14}} + \underbrace{[-D]}_{a_{7,5}} \cdot \underbrace{\Phi_{5,k}}_{x_5} + \\ & + \underbrace{[E]}_{a_{7,6}} \cdot \underbrace{\Phi_{6,k}}_{x_6} + \underbrace{[B]}_{a_{7,7}} \cdot \underbrace{\Phi_{7,k}}_{x_7} + \underbrace{[C]}_{a_{7,8}} \cdot \underbrace{\Phi_{8,k}}_{x_8} + \underbrace{[D]}_{a_{7,9}} \cdot \underbrace{\Phi_{9,k}}_{x_9} = \\ & = \underbrace{-W1 \cdot i_{A,k-1}^s + Q \cdot \Phi_{7,k-1} + P \cdot (\Phi_{6,k-1} + \Phi_{8,k-1}) + \omega_n^r \cdot (N2 \cdot I_{7,k}^f + N1 \cdot (I_{8,k}^f - I_{6,k}^f) - N4 \cdot I_{7,k-1}^f)}_{S_7}. \end{aligned}$$

$$a_{7,5} = -D; \quad a_{7,6} = E; \quad a_{7,7} = B; \quad a_{7,8} = C; \quad a_{7,9} = D; \quad a_{7,13} = Y \cdot (-1) = -Y;$$

$$a_{7,14} = T; \quad a_{7,15} = -T.$$

$$s_7 = -W1 \cdot x_{13,k-1} + Q \cdot x_{7,k-1} + P \cdot (x_{6,k-1} + x_{8,k-1}) + \omega_n^r \cdot (N2 \cdot I_{7,k}^f + N1 \cdot (I_{8,k}^f - I_{6,k}^f) - N4 \cdot I_{7,k-1}^f).$$

$n = 8.$

$$\begin{aligned} & \underbrace{[-T \cdot (-1)]}_{a_{8,13}} \cdot \underbrace{i_{A,k}^s}_{x_{13}} + \underbrace{[Y]}_{a_{8,14}} \cdot \underbrace{i_{C,k}^s}_{x_{14}} + \underbrace{[T \cdot (-1)]}_{a_{8,15}} \cdot \underbrace{i_{B,k}^s}_{x_{15}} + \underbrace{[-D]}_{a_{8,6}} \cdot \underbrace{\Phi_{6,k}}_{x_6} + \\ & + \underbrace{[E]}_{a_{8,7}} \cdot \underbrace{\Phi_{7,k}}_{x_7} + \underbrace{[B]}_{a_{8,8}} \cdot \underbrace{\Phi_{8,k}}_{x_8} + \underbrace{[C]}_{a_{8,9}} \cdot \underbrace{\Phi_{9,k}}_{x_9} + \underbrace{[D]}_{a_{8,10}} \cdot \underbrace{\Phi_{10,k}}_{x_{10}} = \\ & = \underbrace{W1 \cdot i_{C,k-1}^s + Q \cdot \Phi_{8,k-1} + P \cdot (\Phi_{7,k-1} + \Phi_{9,k-1}) + \omega_n^r \cdot (N2 \cdot I_{8,k}^f + N1 \cdot (I_{9,k}^f - I_{7,k}^f) - N4 \cdot I_{8,k-1}^f)}_{S_8}. \end{aligned}$$

$$a_{8,6} = -D; \quad a_{8,7} = E; \quad a_{8,8} = B; \quad a_{8,9} = C; \quad a_{8,10} = D; \quad a_{8,13} = -T \cdot (-1) = T;$$

$$a_{8,14} = Y; \quad a_{8,15} = T \cdot (-1) = -T.$$

$$s_8 = W1 \cdot x_{14,k-1} + Q \cdot x_{8,k-1} + P \cdot (x_{7,k-1} + x_{9,k-1}) + \omega_n^r \cdot (N2 \cdot I_{8,k}^f + N1 \cdot (I_{9,k}^f - I_{7,k}^f) - N4 \cdot I_{8,k-1}^f).$$

$n = 9.$

$$\begin{aligned} & \underbrace{[-T]}_{a_{9,14}} \cdot \underbrace{i_{C,k}^s}_{x_{14}} + \underbrace{[Y \cdot (-1)]}_{a_{9,15}} \cdot \underbrace{i_{B,k}^s}_{x_{15}} + \underbrace{[-D]}_{a_{9,7}} \cdot \underbrace{\Phi_{7,k}}_{x_7} + \underbrace{[E]}_{a_{9,8}} \cdot \underbrace{\Phi_{8,k}}_{x_8} + \underbrace{[B]}_{a_{9,9}} \cdot \underbrace{\Phi_{9,k}}_{x_9} + \underbrace{[C_1]}_{a_{9,10}} \cdot \underbrace{\Phi_{10,k}}_{x_{10}} + \underbrace{[D_1]}_{a_{9,11}} \cdot \underbrace{\Phi_{11,k}}_{x_{11}} = \end{aligned}$$

$$= \underbrace{-W1 \cdot i_{B,k-1}^s + Q \cdot \Phi_{9,k-1} + P \cdot (\Phi_{8,k-1} + \Phi_{10,k-1}) + \omega_n^r \cdot (N2 \cdot I_{9,k}^f + N1 \cdot (I_{10,k}^f - I_{8,k}^f) - N4 \cdot I_{9,k-1}^f)}_{S_9}.$$

$$a_{9,7} = -D; a_{9,8} = E; a_{9,9} = B; a_{9,10} = C_1; a_{9,11} = D_1; a_{9,14} = -T; a_{9,15} = Y \cdot (-1) = -Y.$$

$$s_9 = -W1 \cdot x_{15,k-1} + Q \cdot x_{9,k-1} + P \cdot (x_{8,k-1} + x_{10,k-1}) + \omega_n^r \cdot (N2 \cdot I_{9,k}^f + N1 \cdot (I_{10,k}^f - I_{8,k}^f) - N4 \cdot I_{9,k-1}^f).$$

$n = 10.$

$$\underbrace{\left[\frac{-T \cdot (-1)}{a_{10,15}} \cdot \frac{i_{B,k}^s}{x_{15}} + \frac{-D}{a_{10,8}} \cdot \frac{\Phi_{8,k}}{x_8} + \frac{E}{a_{10,9}} \cdot \frac{\Phi_{9,k}}{x_9} + \frac{B_1}{a_{10,10}} \cdot \frac{\Phi_{10,k}}{x_{10}} + \frac{C_2}{a_{10,11}} \cdot \frac{\Phi_{11,k}}{x_{11}} + \frac{D_2}{a_{10,12}} \cdot \frac{\Phi_{12,k}}{x_{12}} \right]}_{S_{10}} =$$

$$= \underbrace{Q_1 \cdot \Phi_{10,k-1} + P \cdot (\Phi_{9,k-1} + 5 \cdot \Phi_{11,k-1}) + \omega_n^r \cdot (N2 \cdot I_{10,k}^f + N1 \cdot (I_{11,k}^f - I_{9,k}^f) - N4 \cdot I_{10,k-1}^f)}_{S_{10}}.$$

$$a_{10,8} = -D; a_{10,9} = E; a_{10,10} = B_1; a_{10,11} = C_2; a_{10,12} = D_2; a_{10,15} = -T \cdot (-1) = T.$$

$$s_{10} = Q_1 \cdot x_{10,k-1} + P \cdot (x_{9,k-1} + 5 \cdot x_{11,k-1}) + \omega_n^r \cdot (N2 \cdot I_{10,k}^f + N1 \cdot (I_{11,k}^f - I_{9,k}^f) - N4 \cdot I_{10,k-1}^f).$$

$n = 11.$

$$\underbrace{\left[\frac{-D}{a_{11,9}} \cdot \frac{\Phi_{9,k}}{x_9} + \frac{E_1}{a_{11,10}} \cdot \frac{\Phi_{10,k}}{x_{10}} + \frac{B_2}{a_{11,11}} \cdot \frac{\Phi_{11,k}}{x_{11}} + \frac{C_3}{a_{11,12}} \cdot \frac{\Phi_{12,k}}{x_{12}} + \frac{D_3}{a_{11,1}} \cdot \frac{\Phi_{1,k}}{x_1} \right]}_{S_{11}} =$$

$$= \underbrace{Q_2 \cdot \Phi_{11,k-1} + P \cdot (5 \cdot \Phi_{10,k-1} + 50 \cdot \Phi_{12,k-1}) + \omega_n^r \cdot (N2 \cdot I_{11,k}^f + N1 \cdot (I_{12,k}^f - I_{10,k}^f) - N4 \cdot I_{11,k-1}^f)}_{S_{11}}.$$

$$a_{11,9} = -D; a_{11,10} = E_1; a_{11,11} = B_2; a_{11,12} = C_3; a_{11,1} = D_3.$$

$$s_{11} = Q_2 \cdot x_{11,k-1} + P \cdot (5 \cdot x_{10,k-1} + 50 \cdot x_{12,k-1}) + \omega_n^r \cdot (N2 \cdot I_{11,k}^f + N1 \cdot (I_{12,k}^f - I_{10,k}^f) - N4 \cdot I_{11,k-1}^f).$$

$n = 12.$

$$\underbrace{\left[\frac{-D_1}{a_{12,10}} \cdot \frac{\Phi_{10,k}}{x_{10}} + \frac{E_2}{a_{12,11}} \cdot \frac{\Phi_{11,k}}{x_{11}} + \frac{B_3}{a_{12,12}} \cdot \frac{\Phi_{12,k}}{x_{12}} + \frac{C_5}{a_{12,1}} \cdot \frac{\Phi_{1,k}}{x_1} + \frac{D_2}{a_{12,2}} \cdot \frac{\Phi_{2,k}}{x_2} \right]}_{S_{12}} =$$

$$= \underbrace{Q_3 \cdot \Phi_{12,k-1} + P \cdot (50 \cdot \Phi_{11,k-1} + 500 \cdot \Phi_{1,k-1}) + \omega_n^r \cdot (N2 \cdot I_{12,k}^f + N1 \cdot (I_{1,k}^f - I_{11,k}^f) - N4 \cdot I_{12,k-1}^f)}_{S_{12}}.$$

$$a_{12,10} = -D_1; a_{12,11} = E_2; a_{12,12} = B_3; a_{12,1} = C_5; a_{12,2} = D_2.$$

$$s_{12} = Q_3 \cdot x_{12,k-1} + P \cdot (50 \cdot x_{11,k-1} + 500 \cdot x_{1,k-1}) + \omega_n^r \cdot (N2 \cdot I_{12,k}^f + N1 \cdot (I_{1,k}^f - I_{11,k}^f) - N4 \cdot I_{12,k-1}^f).$$

Элементы строк 13 и 14 и 15 матрицы **A** и соответствующие элементы матрицы-столбца **S** определяются из **баланса электрических напряжений обмоток статора**.

$$\begin{cases} U_A = \omega_n^s \cdot \frac{d}{dt} \cdot (\Phi_4 - \Phi_7) + r^s \cdot i_A^s + L_A^s \cdot \frac{di_A^s}{dt}; \\ U_B = \omega_n^s \cdot \frac{d}{dt} \cdot (\Phi_6 - \Phi_9) + r^s \cdot i_B^s + L_B^s \cdot \frac{di_B^s}{dt}; \\ U_C = \omega_n^s \cdot \frac{d}{dt} \cdot (\Phi_8 - \Phi_5) + r^s \cdot i_C^s + L_C^s \cdot \frac{di_C^s}{dt}, \end{cases} \quad (5)$$

где $U_A = U_M \cdot \cos \omega t$;

$$U_B = U_M \cdot \cos(\omega t - 2\pi / 3); \quad (6)$$

$$U_C = U_M \cdot \cos(\omega t - 4\pi / 3).$$

С учетом шага по времени Δt в k -й момент времени:

$$\begin{cases} U_{A,k} = U_M \cdot \cos[\omega \cdot (k-1) \cdot \Delta t]; \\ U_{B,k} = U_M \cdot \cos[\omega \cdot (k-1) \cdot \Delta t - 2\pi / 3]; \\ U_{C,k} = U_M \cdot \cos[\omega \cdot (k-1) \cdot \Delta t - 4\pi / 3]. \end{cases} \quad (7)$$

$n = 13$.

Выразим производные тока i_A^s , потоков Φ_4 и Φ_7 через конечные разности:

$$\frac{di_A^s}{dt} = \frac{i_{A,k}^s - i_{A,k-1}^s}{\Delta t}; \quad \frac{d\Phi_4}{dt} = \frac{\Phi_{4,k} - \Phi_{4,k-1}}{\Delta t}; \quad \frac{d\Phi_7}{dt} = \frac{\Phi_{7,k} - \Phi_{7,k-1}}{\Delta t}.$$

$$U_{A,k} = \frac{\omega_n}{\Delta t} \cdot \Phi_{4,k} - \frac{\omega_n}{\Delta t} \cdot \Phi_{4,k-1} - \frac{\omega_n}{\Delta t} \cdot \Phi_{7,k} + \frac{\omega_n}{\Delta t} \cdot \Phi_{7,k-1} + r^s \cdot i_{A,k}^s + \frac{L_A^s}{\Delta t} \cdot i_{A,k}^s - \frac{L_A^s}{\Delta t} \cdot i_{A,k-1}^s.$$

$$\underbrace{\frac{\omega_n^s}{\Delta t} \cdot \Phi_{4,k}}_{a_{13,4}} + \underbrace{\left(-\frac{\omega_n^s}{\Delta t}\right) \cdot \Phi_{7,k}}_{a_{13,7}} + \underbrace{\left(r^s + \frac{L_A^s}{\Delta t}\right) \cdot i_{A,k}^s}_{a_{13,13}} = \underbrace{\frac{\omega_n^s}{\Delta t} \cdot (\Phi_{4,k-1} - \Phi_{7,k-1}) + \frac{L_A^s}{\Delta t} \cdot i_{A,k-1}^s + U_{A,k}}_{s_{13}}.$$

Обозначим $\frac{\omega_n^s}{\Delta t} = U$; $r^s + \frac{L_A^s}{\Delta t} = A_S$;

$$a_{13,4} = U; \quad a_{13,7} = -U; \quad s_{13} = U \cdot (x_{4,k-1} - x_{7,k-1}) + \frac{L_A^s}{\Delta t} \cdot x_{13,k-1} + U_{A,k}.$$

Аналогично для строк 14 и 15:

$n = 14$.

$$\underbrace{[U]}_{a_{14,6}} \cdot \underbrace{\Phi_{6,k}}_{x_6} + \underbrace{[-U]}_{a_{14,9}} \cdot \underbrace{\Phi_{9,k}}_{x_9} + \underbrace{\left(r^s + \frac{L_B^s}{\Delta t}\right) \cdot i_{B,k}^s}_{a_{14,15}} = \underbrace{U \cdot (\Phi_{6,k-1} - \Phi_{9,k-1}) + \frac{L_B^s}{\Delta t} \cdot i_{B,k-1}^s + U_{B,k}}_{s_{14}}.$$

$$a_{14,6} = U; \quad a_{14,9} = -U; \quad a_{14,15} = r^s + \frac{L_B^s}{\Delta t} = B_S; \quad s_{14} = U \cdot (x_{6,k-1} - x_{9,k-1}) + \frac{L_B^s}{\Delta t} \cdot x_{14,k-1} + U_{B,k}.$$

$n = 15$.

$$\underbrace{[U]}_{a_{15,8}} \cdot \underbrace{\Phi_{8,k}}_{x_8} + \underbrace{[-U]}_{a_{15,5}} \cdot \underbrace{\Phi_{5,k}}_{x_5} + \underbrace{\left(r^s + \frac{L_C^s}{\Delta t}\right) \cdot i_{C,k}^s}_{a_{15,14}} = \underbrace{U \cdot (\Phi_{8,k-1} - \Phi_{5,k-1}) + \frac{L_C^s}{\Delta t} \cdot i_{C,k-1}^s + U_{C,k}}_{s_{15}}.$$

$$a_{15,8} = U; \quad a_{15,5} = -U; \quad a_{15,14} = r^s + \frac{L_C^s}{\Delta t} = C_S; \quad s_{15} = U \cdot (x_{8,k-1} - x_{5,k-1}) + \frac{L_C^s}{\Delta t} \cdot x_{15,k-1} + U_{C,k}.$$

$n = 16$.

Наконец, сумма токов определяет элементы шестнадцатой строки матрицы **A** и элемент s_{16} матрицы-столбца **S**.

$$\underbrace{[1]}_{a_{16,13}} \cdot \underbrace{i_{A,k}^s}_{x_{13}} + \underbrace{[1]}_{a_{16,15}} \cdot \underbrace{i_{B,k}^s}_{x_{15}} + \underbrace{[1]}_{a_{16,14}} \cdot \underbrace{i_{C,k}^s}_{x_{14}} + \underbrace{[-1]}_{a_{16,16}} \cdot \underbrace{i_{0,k}^s}_{x_{16}} = \underbrace{0}_{s_{16}}.$$

Окончательно, матрица **A** примет следующий вид, удобный для программирования в MATLAB (рис. 5):

Неизвестные переменные (потоки и токи в статорной обмотке) в k -й момент времени определяются в результате следующей операции с матрицами:

$$\mathbf{X} = \mathbf{A}^{-1} \cdot \mathbf{S},$$

Далее, подставляя в уравнение (1) $n = 1...12$, определяем суммарные токи (М.Д.С.) в роторе:

$$IR_1 = \left(i_1^r + I_{1,k}^f\right) \cdot \omega_n^r = -\underbrace{\Phi_{12}}_{x_{12}} \cdot (500 \cdot R_\delta) + \underbrace{\Phi_1}_{x_1} \cdot \underbrace{(500 \cdot R_\delta + 50 \cdot R_\delta)}_{550 \cdot R_\delta} - \underbrace{\Phi_2}_{x_2} \cdot (50 \cdot R_\delta);$$

$$IR_2 = \left(i_2^r + I_{2,k}^f\right) \cdot \omega_n^r = -\underbrace{\Phi_1}_{x_1} \cdot (50 \cdot R_\delta) + \underbrace{\Phi_2}_{x_2} \cdot (50 \cdot R_\delta + 5 \cdot R_\delta) - \underbrace{\Phi_3}_{x_3} \cdot (5 \cdot R_\delta);$$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16				
1	B ₅	C ₆	D ₁								-D ₂	E ₃								
2	E ₅	B ₆	C ₇	D								-D ₃								
3	-D ₂	E ₆	B ₇	C	D								T							
4		-D ₁	E ₇	B	C	D							Y	-T						
5			-D	E	B	C	D						-T	-Y	T					
6				-D	E	B	C	D					-T	T	Y					
7					-D	E	B	C	D				-Y	T	-T					
8						-D	E	B	C	D			T	Y	-T					
9							-D	E	B	C ₁	D ₁				-T	-Y				
10								-D	E	B ₁	C ₂	D ₂				T				
11	D ₃								-D	E ₁	B ₂	C ₃								
12	C ₅	D ₂								-D ₁	E ₂	B ₃								
13	U												-U				A _S			
14	U					-U					B _S									
15	-U				U				-U				C _S							
16													1		1		1		-1	

Рис. 5

$$\begin{aligned}
 IR_3 &= (i_3^r + I_{3,k}^f) \cdot \omega_n^r = -\underbrace{\Phi_2}_{x_2} \cdot (5 \cdot R_\delta) + \underbrace{\Phi_3}_{x_3} \cdot \underbrace{(5 \cdot R_\delta + R_\delta)}_{6 \cdot R_\delta} - \underbrace{\Phi_4}_{x_4} \cdot R_\delta; \\
 IR_4 &= (i_4^r + I_{4,k}^f) \cdot \omega_n^r = -\omega_n^s \cdot \underbrace{i_{13}^s}_{x_{13}} - \underbrace{\Phi_3}_{x_3} \cdot R_\delta + \underbrace{\Phi_4}_{x_4} \cdot (R_\delta + R_\delta) - \underbrace{\Phi_5}_{x_5} \cdot R_\delta = \\
 &= -\omega_n^s \cdot x_{13} + 2 \cdot R_\delta \cdot x_4 - R_\delta \cdot (x_3 + x_5); \\
 IR_5 &= (i_5^r + I_{5,k}^f) \cdot \omega_n^r = -\omega_n^s \cdot (-1) \cdot x_{14} + 2 \cdot R_\delta \cdot x_5 - R_\delta \cdot (x_4 + x_6); \\
 IR_6 &= (i_6^r + I_{6,k}^f) \cdot \omega_n^r = -\omega_n^s \cdot x_{15} + 2 \cdot R_\delta \cdot x_6 - R_\delta \cdot (x_5 + x_7); \\
 IR_7 &= (i_7^r + I_{7,k}^f) \cdot \omega_n^r = -\omega_n^s \cdot (-1) \cdot x_{13} + 2 \cdot R_\delta \cdot x_7 - R_\delta \cdot (x_6 + x_8); \\
 IR_8 &= (i_8^r + I_{8,k}^f) \cdot \omega_n^r = -\omega_n^s \cdot x_{14} + 2 \cdot R_\delta \cdot x_8 - R_\delta \cdot (x_7 + x_9); \\
 IR_9 &= (i_9^r + I_{9,k}^f) \cdot \omega_n^r = -\omega_n^s \cdot (-1) \cdot x_{15} + 2 \cdot R_\delta \cdot x_9 - R_\delta \cdot (x_8 + x_{10}); \\
 IR_{10} &= (i_{10}^r + I_{10,k}^f) \cdot \omega_n^r = -\underbrace{\Phi_9}_{x_9} \cdot R_\delta + \underbrace{\Phi_{10}}_{x_{10}} \cdot \underbrace{(5 \cdot R_\delta + R_\delta)}_{6 \cdot R_\delta} - \underbrace{\Phi_{11}}_{x_{11}} \cdot (5 \cdot R_\delta); \\
 IR_{11} &= (i_{11}^r + I_{11,k}^f) \cdot \omega_n^r = -\underbrace{\Phi_{10}}_{x_{10}} \cdot (5 \cdot R_\delta) + \underbrace{\Phi_{11}}_{x_{11}} \cdot \underbrace{(50 \cdot R_\delta + 5 \cdot R_\delta)}_{55 \cdot R_\delta} - \underbrace{\Phi_{12}}_{x_{12}} \cdot (50 \cdot R_\delta); \\
 IR_{12} &= (i_{12}^r + I_{12,k}^f) \cdot \omega_n^r = -\underbrace{\Phi_{11}}_{x_{11}} \cdot (50 \cdot R_\delta) + \underbrace{\Phi_{12}}_{x_{12}} \cdot \underbrace{(500 \cdot R_\delta + 50 \cdot R_\delta)}_{550 \cdot R_\delta} - \underbrace{\Phi_{13}}_{x_{13}} \cdot (500 \cdot R_\delta);
 \end{aligned}$$

Электромагнитные усилия на зубцовом делении определяются по следующим формулам:

$$\begin{aligned}
 F_1 &= \frac{x_2 - x_{12}}{2t_z} \cdot (i_1^r + I_{1,k}^f) \cdot \omega_n^r; & F_2 &= \frac{x_3 - x_1}{2t_z} \cdot (i_2^r + I_{2,k}^f) \cdot \omega_n^r; \\
 F_3 &= \frac{x_4 - x_2}{2t_z} \cdot (i_3^r + I_{3,k}^f) \cdot \omega_n^r; & F_4 &= \frac{x_5 - x_3}{2t_z} \cdot (i_4^r + I_{4,k}^f) \cdot \omega_n^r;
 \end{aligned}$$

$$F_5 = \frac{x_6 - x_4}{2t_z} \cdot (i_5^r + I_{5,k}^f) \cdot \omega_n^r;$$

$$F_6 = \frac{x_7 - x_5}{2t_z} \cdot (i_6^r + I_{6,k}^f) \cdot \omega_n^r;$$

$$F_7 = \frac{x_8 - x_6}{2t_z} \cdot (i_7^r + I_{7,k}^f) \cdot \omega_n^r;$$

$$F_8 = \frac{x_9 - x_7}{2t_z} \cdot (i_8^r + I_{8,k}^f) \cdot \omega_n^r;$$

$$F_9 = \frac{x_{10} - x_8}{2t_z} \cdot (i_9^r + I_{9,k}^f) \cdot \omega_n^r;$$

$$F_{10} = \frac{x_{11} - x_9}{2t_z} \cdot (i_{10}^r + I_{10,k}^f) \cdot \omega_n^r;$$

$$F_{11} = \frac{x_{12} - x_{10}}{2t_z} \cdot (i_{11}^r + I_{11,k}^f) \cdot \omega_n^r;$$

$$F_{12} = \frac{x_1 - x_{11}}{2t_z} \cdot (i_{12}^r + I_{12,k}^f) \cdot \omega_n^r.$$

$$\text{Суммарное усилие: } F_\Sigma = \sum_{n=1}^{12} F_n.$$

$$\text{Линейная скорость ротора в } k\text{-й момент времени: } v_k = v_{k-1} + \frac{F_\Sigma - F_c}{m} \cdot \Delta t.$$

Математическая модель синхронного неявнополюсного дугостаторного двигателя реализована в программном пакете MATLAB методом Гаусса-Жордана. Ниже приведен пример расчета.

```
% Математическая модель СНДД с укладкой статорной обмотки классическим
% способом (z=6) с нулевым проводом
% function CNDD_6_zero
% Исходные данные синхронного двигателя
Rb=0.1003*10^7;
rs=1.9;
LsA=0.074;
LsB=0.076;
LsC=0.07;
rr=6.75;
Lr=0.074;
dt=0.001;
As=rs+LsA/dt;
Bs=rs+LsB/dt;
Cs=rs+LsC/dt;
tz=9.769*10^-3;
tau=3*tz;
m=22.8;
v0=0;
wns=100;
wnr=600;
UA=wns/dt;
X=zeros(16,1);
F=0;
w12=5.2;
mass_Um = 0;
mass_f = 0;
mass_t = 0;
tk=4;
Ukon=180;
Unach=20;

K=input('Длительность цикла k=');
for k=1:(K+1)
    if ((k*dt >= 0) && (k*dt <=tk))
        fc = k*dt*40/tk;
        vs=2*tau*fc;
```

```

        eps=0.15;
    if (vs-v0)>eps
        ss=(vs-v0)/vs;
    else
        ss=0;
    end
    w=2*pi*fc;
    Um = Unach+(Ukon-Unach)*((k*dt)^1)/((tk)^1);
end;
if (k*dt > tk)
    fc=40+2*((tanh(k*dt-1)^0.6))*0;
    vs=2*tau*fc;
    eps=0.15;
    if (vs-v0)>eps
        ss=(vs-v0)/vs;
    else
        ss=0;
    end;
    w=2*pi*fc;
    Um = Ukon+10*((tanh(k*dt-1)^0.6))*0;
end;
if ((k*dt >= 0) && (k*dt <= 4))
    Fc = 0;
end;
if (k*dt > 5)
    Fc=0;
end;
if ((k*dt >= 0) && (k*dt <= 0.5))
    Ufm=k*dt*5/(0.5);
    Ifm=Ufm/rr;
    end;
    if (k*dt > 0.5)
    Ufm=5;
    Ifm=Ufm/rr;
    end;
    if (k*dt > 4)
    Ufm=1;
    Ifm=Ufm/rr;
    end;
    if (k*dt > 4)
    Ufm=1;
    Ifm=Ufm/rr;
    end;

v(1,k)=v0;          % Создание вектор-строки для графика скорости
f(1,k)=sum(F)-Fc;   % Создание вектор-строки для графика усилия
Ua=Um*cos(w*(k-1)*dt);
Ub=Um*cos(w*(k-1)*dt-2*pi/3);
Uc=Um*cos(w*(k-1)*dt-4*pi/3);
i0(1,k)=X(16);
i_a(1,k)=X(13);
i_b(1,k)=X(15);
i_c(1,k)=X(14);

% Формирование матрицы A
A=zeros(16);

```

$$N1=Lr*v0/(wnr*2*dt);$$

$$N2=(rr+Lr/dt)/wnr;$$

$$N3=wnr/dt;$$

$$N4=Lr/(wnr*dt);$$

$$N5=(wnr^2)/Lr;$$

$$B=2*Rb*N2+N3;$$

$$B1=6*Rb*N2-4*Rb*N1+N3;$$

$$B2=55*Rb*N2-45*Rb*N1+N3;$$

$$B3=550*Rb*N2-450*Rb*N1+N3;$$

$$B5=550*Rb*N2+450*Rb*N1+N3;$$

$$B6=55*Rb*N2+45*Rb*N1+N3;$$

$$B7=6*Rb*N2+4*Rb*N1+N3;$$

$$C=-Rb*N2+(2*Rb+N5)*N1;$$

$$C1=-Rb*N2+(6*Rb+N5)*N1;$$

$$C2=-5*Rb*N2+(55*Rb+N5)*N1;$$

$$C3=-50*Rb*N2+(550*Rb+N5)*N1;$$

$$C5=-500*Rb*N2+(550*Rb+N5)*N1;$$

$$C6=-50*Rb*N2+(55*Rb+N5)*N1;$$

$$C7=-5*Rb*N2+(6*Rb+N5)*N1;$$

$$D=-Rb*N1;$$

$$D1=5*D;$$

$$D2=50*D;$$

$$D3=500*D;$$

$$E=-Rb*N2-(2*Rb+N5)*N1;$$

$$E1=-5*Rb*N2-(6*Rb+N5)*N1;$$

$$E2=-50*Rb*N2-(55*Rb+N5)*N1;$$

$$E3=-500*Rb*N2-(550*Rb+N5)*N1;$$

$$E5=-50*Rb*N2-(550*Rb+N5)*N1;$$

$$E6=-5*Rb*N2-(55*Rb+N5)*N1;$$

$$E7=-Rb*N2-(6*Rb+N5)*N1;$$

$$T=-wns*N1;$$

$$Y=-wns*N2;$$

for n=1:12

$$If(n)=Ifm*\sin((1-ss)*w*k*dt-((pi/3)*n+w12*pi/6));$$

end;

for n=1:12

$$If1(n)=Ifm*\sin((1-ss)*w*(k-1)*dt-((pi/3)*n+w12*pi/6));$$

end;

$$W1=-wns*N4;$$

$$P=-Rb*N4;$$

$$Q=2*Rb*N4+N3;$$

$$Q1=6*Rb*N4+N3;$$

$$Q2=55*Rb*N4+N3;$$

$$Q3=550*Rb*N4+N3;$$

for n=1:3

$$A(n+2,n+12)=(-1)^(n+1)*T;$$

$$A(n+3,n+12)=(-1)^(n+1)*Y;$$

$$A(n+4,n+12)=(-1)^n*T;$$

```

A(n+5,n+12)=(-1)^n*T;
A(n+6,n+12)=(-1)^n*Y;
A(n+7,n+12)=(-1)^(n+1)*T;
end;

for n=1:3
    A(16,n+12)=1;%hh
end;
    A(16,16)=-1;%jgj

for n=1:6
    A(n+3,n+3)=B;
    A(n+4,n+3)=E;
    A(n+2,n+3)=C;
end;
for n=1:7
    A(n+1,n+3)=D;
    A(n+4,n+2)=-D;
end;
    A(1,1)=B5;
    A(1,2)=C6;
    A(1,3)=D1;
    A(1,11)=-D2;
    A(1,12)=E3;
    A(2,1)=E5;
    A(2,2)=B6;
    A(2,3)=C7;
    A(2,12)=-D3;
    A(3,1)=-D2;
    A(3,2)=E6;
    A(3,3)=B7;
    A(4,2)=-D1;
    A(4,3)=E7;
    A(9,10)=C1;
    A(9,11)=D1;
    A(10,10)=B1;
    A(10,11)=C2;
    A(10,12)=D2;
    A(11,1)=D3;
    A(11,10)=E1;
    A(11,11)=B2;
    A(11,12)=C3;
    A(12,1)=C5;
    A(12,2)=D2;
    A(12,10)=-D1;
    A(12,11)=E2;
    A(12,12)=B3;

    A(13,4)=UA;
    A(14,6)=UA;
    A(15,8)=UA;
    A(13,7)=-UA;
    A(14,9)=-UA;
    A(15,5)=-UA;
    A(13,13)=As;
    A(14,15)=Bs;

```

```

A(15,14)=Cs;

% Матрица свободных членов
S=[ Q3*X(1)+P*(500*X(12)+50*X(2))+wnr*N2*If(1)+wnr*N1*(If(2)-If(12))-
wnr*N4*If1(1); %1
Q2*X(2)+P*(50*X(1)+5*X(3))+wnr*N2*If(2)+wnr*N1*(If(3)-If(1))-wnr*N4*If1(2); %2
Q1*X(3)+P*(5*X(2)+X(4))+wnr*N2*If(3)+wnr*N1*(If(4)-If(2))-wnr*N4*If1(3); %3
W1*X(13)+Q*X(4)+P*(X(3)+X(5))+wnr*N2*If(4)+wnr*N1*(If(5)-If(3))-wnr*N4*If1(4); %4
-1)*W1*X(14)+Q*X(5)+P*(X(4)+X(6))+wnr*N2*If(5)+wnr*N1*(If(6)-If(4))-
wnr*N4*If1(5); %5
W1*X(15)+Q*X(6)+P*(X(5)+X(7))+wnr*N2*If(6)+wnr*N1*(If(7)-If(5))-wnr*N4*If1(6); %6
(-1)*W1*X(13)+Q*X(7)+P*(X(6)+X(8))+wnr*N2*If(7)+wnr*N1*(If(8)-If(6))-
wnr*N4*If1(7); %7
W1*X(14)+Q*X(8)+P*(X(7)+X(9))+wnr*N2*If(8)+wnr*N1*(If(9)-If(7))-wnr*N4*If1(8); %8
(-1)*W1*X(15)+Q*X(9)+P*(X(8)+X(10))+wnr*N2*If(9)+wnr*N1*(If(10)-If(8))-
wnr*N4*If1(9); %9
Q1*X(10)+P*(X(9)+5*X(11))+wnr*N2*If(10)+wnr*N1*(If(11)-If(9))-wnr*N4*If1(10); %10
Q2*X(11)+P*(5*X(10)+50*X(12))+wnr*N2*If(11)+wnr*N1*(If(12)-If(10))-wnr*N4*If1(11); %11
Q3*X(12)+P*(50*X(11)+500*X(1))+wnr*N2*If(12)+wnr*N1*(If(1)-If(11))-wnr*N4*If1(12); %12

UA*(X(4)-X(7))+(LsA/dt)*X(13)+Ua; %13
UA*(X(6)-X(9))+(LsB/dt)*X(15)+Ub; %14
UA*(X(8)-X(5))+(LsC/dt)*X(14)+Uc; %15
0]; %16

% Решение методом Гаусса-Жордана
Z=rref([A S]); %Приведение расширенной матрицы к треугольному виду
X=Z(1:16,17:17); %Выделение последнего столбца из матрицы

% Ток в роторе
IR=[ Rb*(550*X(1)-50*X(2)-500*X(12)); %1
Rb*(55*X(2)-5*X(3)-50*X(1)); %2
Rb*(6*X(3)-X(4)-X(2)); %3
(-wns*X(13)+Rb*(2*X(4)-X(5)-X(3))); %4
((-1)*(-wns)*X(14)+Rb*(2*X(5)-X(6)-X(4))); %5
(-wns*X(15)+Rb*(2*X(6)-X(7)-X(5))); %6
((-1)*(-wns)*X(13)+Rb*(2*X(7)-X(8)-X(6))); %7
(-wns*X(14)+Rb*(2*X(8)-X(9)-X(7))); %8
((-1)*(-wns)*X(15)+Rb*(2*X(9)-X(10)-X(8))); %9
Rb*(6*X(10)-5*X(11)-X(9)); %10
Rb*(55*X(11)-50*X(12)-5*X(10)); %11
Rb*(550*X(12)-500*X(1)-50*X(11))]; %12

% Электромагнитное усилие
F(1)=(X(2)-X(12))* (IR(1))/(2*tz);
for n=1:10
F(n+1)=(X(n+2)-X(n))* (IR(n+1))/(2*tz);
end;
F(12)=(X(1)-X(11))* (IR(12))/(2*tz);

% Скорость
v0=v0+((sum(F)-Fc)/m)*dt;
mass_Um(k)=Um;
mass_fc(k)=fc;
mass_t(k)=k*dt;
end;

```

```
% Построение графиков
figure(1);
plot(mass_t,mass_Um,'r',mass_t,mass_fc,'b');
grid on;
axis([0 5 0 100]);
figure(2);
k=0:K;
subplot(2,1,1);
plot(k*dt,v);
title('Скорость');
xlabel('t,c');
ylabel('v,m/c');
grid on;
subplot(2,1,2);
plot(k*dt,f);
title('Сила');
xlabel('t,c');
ylabel('F,H');
grid on;
%end
```

Временные зависимости скорости и электромагнитного усилия синхронного неявнополюсного дугостаторного двигателя в режиме частотного пуска представлены на рис. 6 и рис. 7.

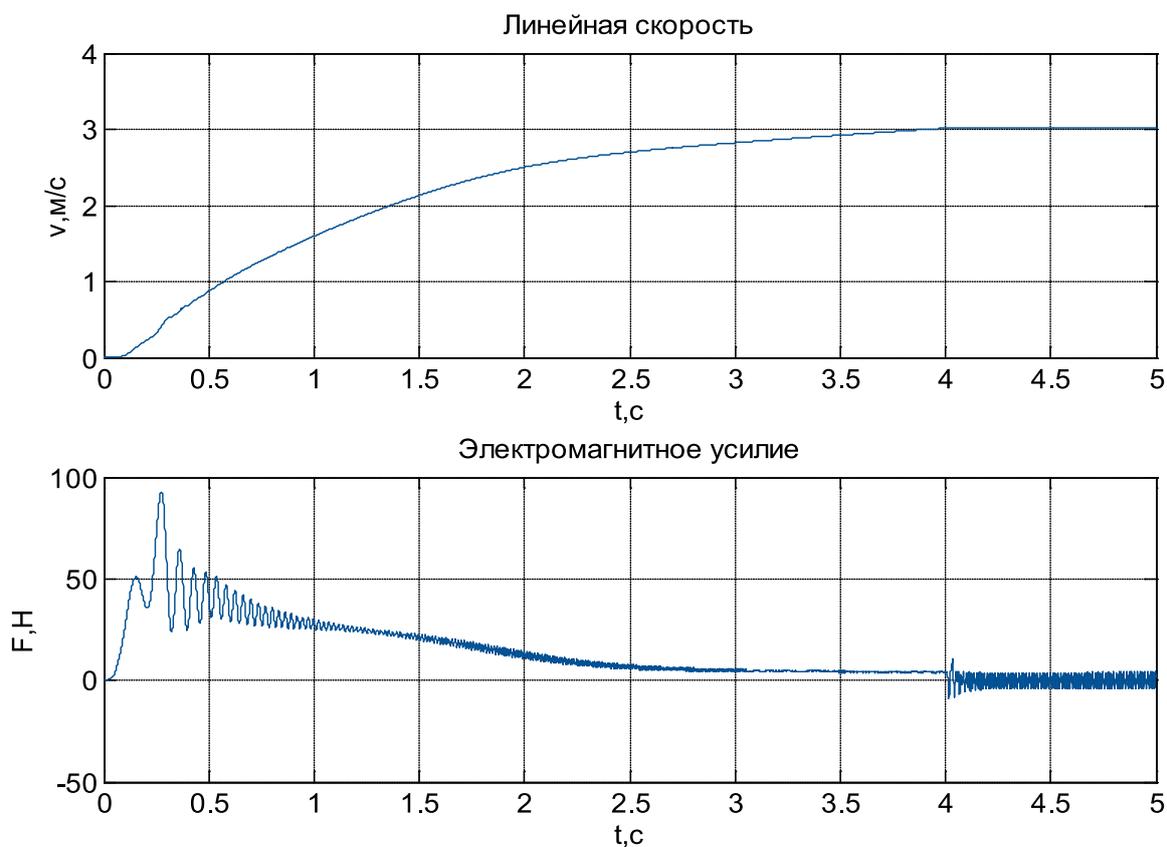


Рис. 6. Результат моделирования синхронного неявнополюсного дугостаторного двигателя в режиме частотного пуска

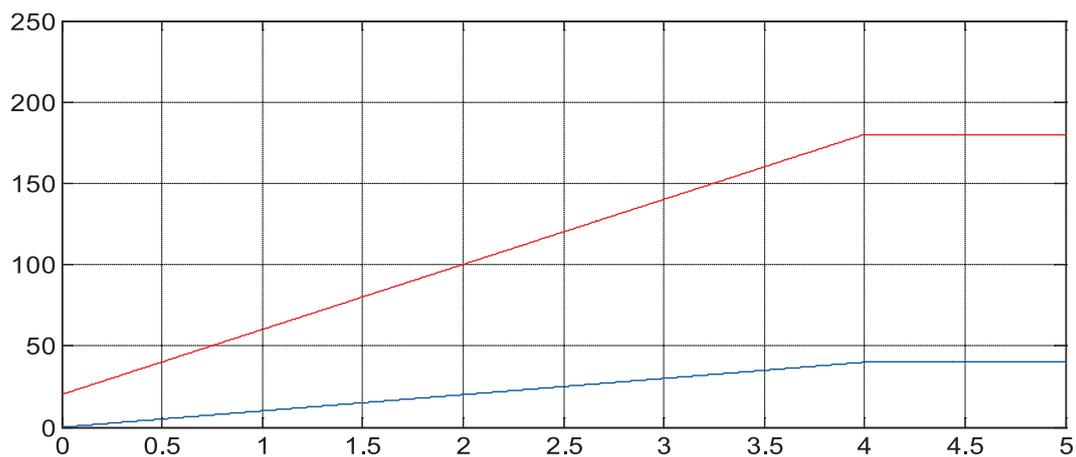


Рис. 7. Изменение напряжения U_m и частоты f при частотном пуске

Результаты расчетов СНДД потока Φ и токов I^f и IR в различные моменты времени, рис. 8, рис. 9 и рис. 10.

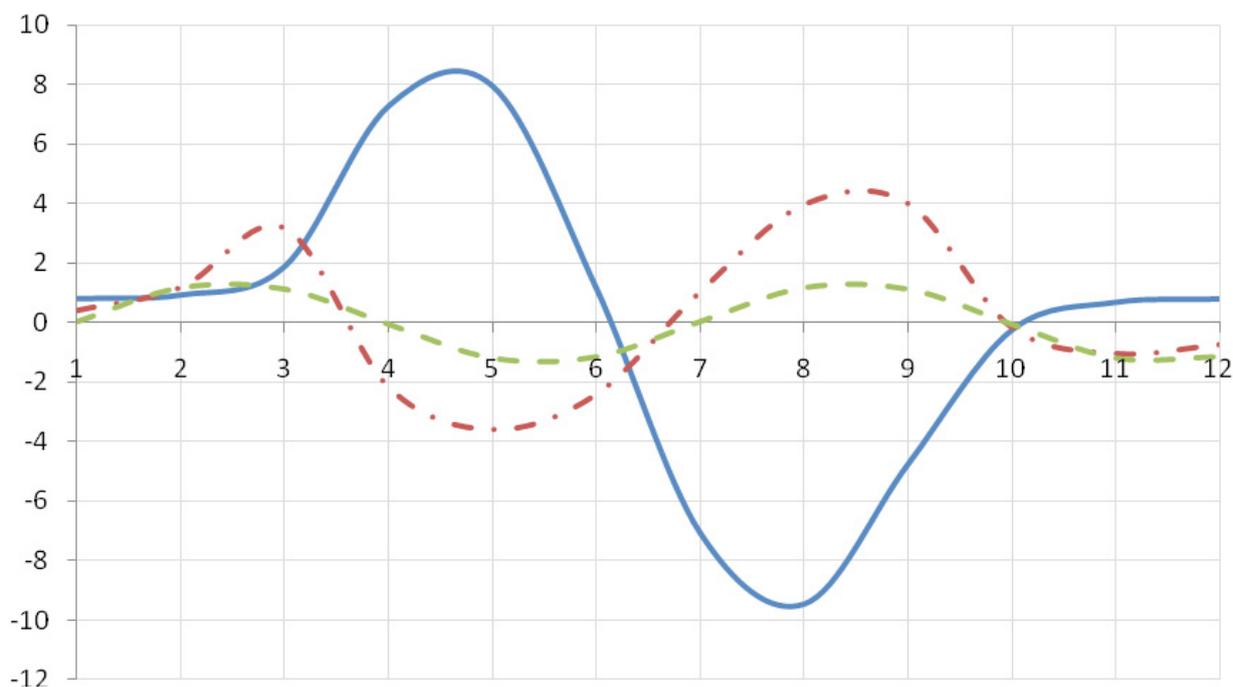


Рис. 8. Результат моделирования потока Φ , тока I^f и результирующего тока в обмотке ротора при $k = 150$

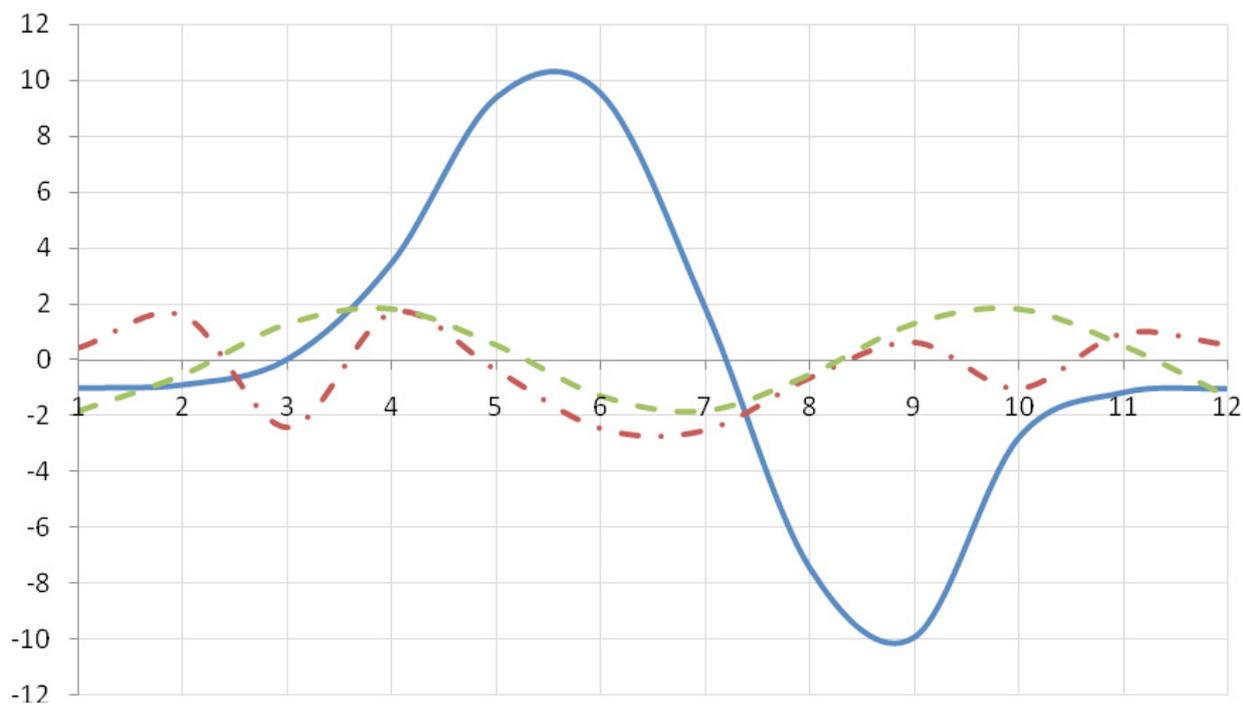


Рис. 9. Результат моделирования потока Φ , тока I и результирующего тока в обмотке ротора при $k = 210$

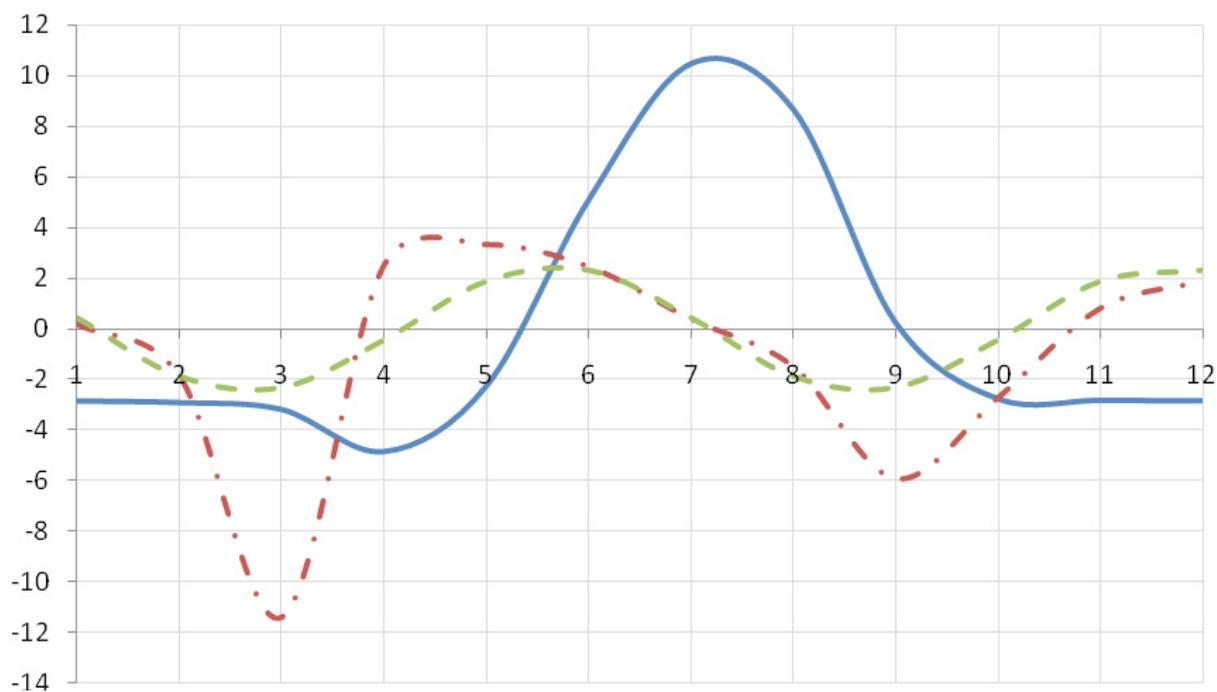


Рис. 10. Результат моделирования потока Φ , тока I и результирующего тока в обмотке ротора при $k = 275$

Зависимости токов i_A^s , i_B^s , i_C^s и i_0^s даны на рис. 13.

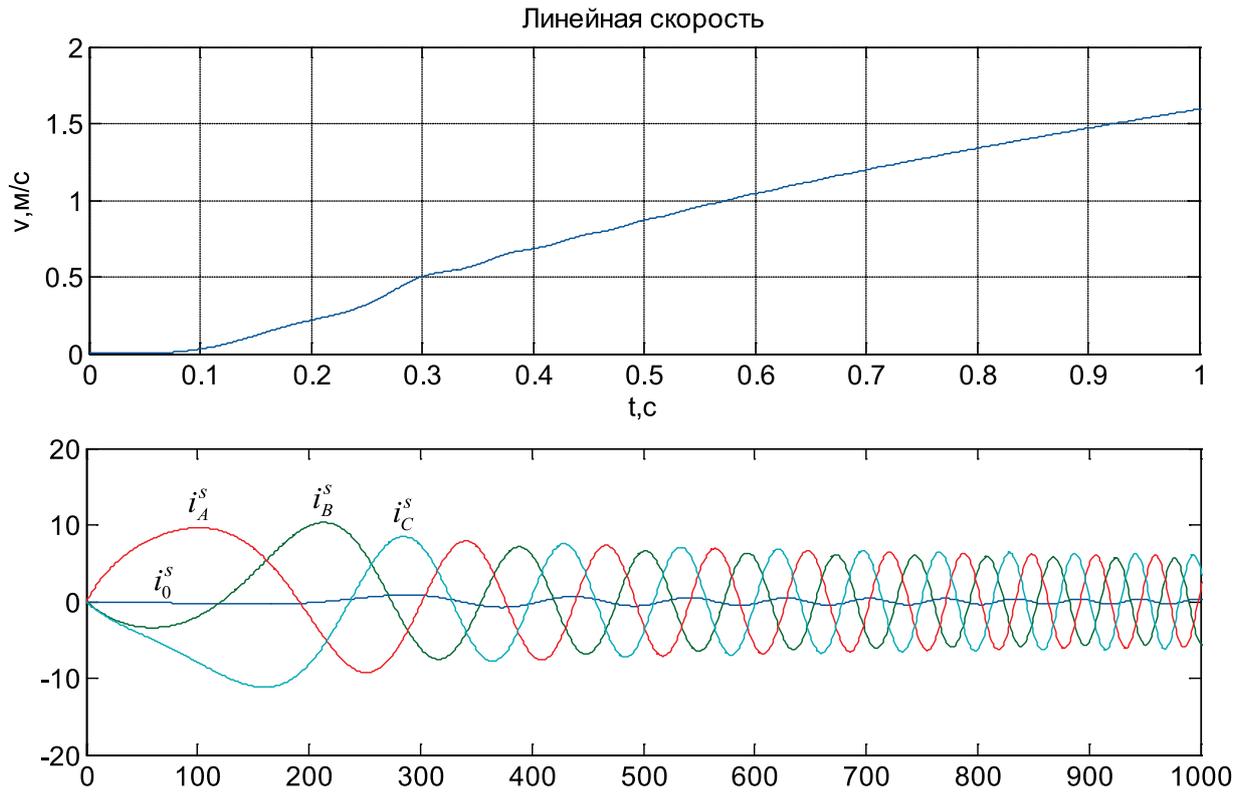


Рис. 11. Временные зависимости i_A^s, i_B^s, i_C^s и i_0^s при $k = 1000$

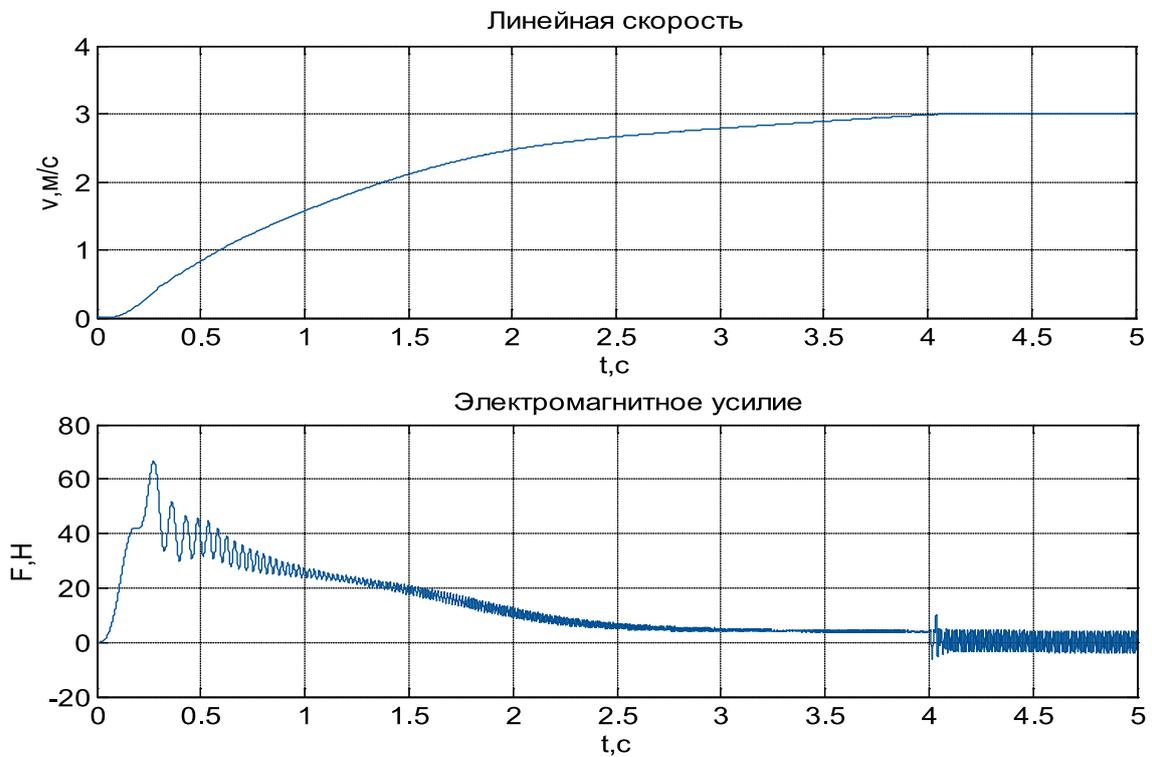


Рис. 12. Результат моделирования синхронного неявнополюсного дугостаторного двигателя в режиме частотного пуска при $r^s = 2.8, m = 20.9$

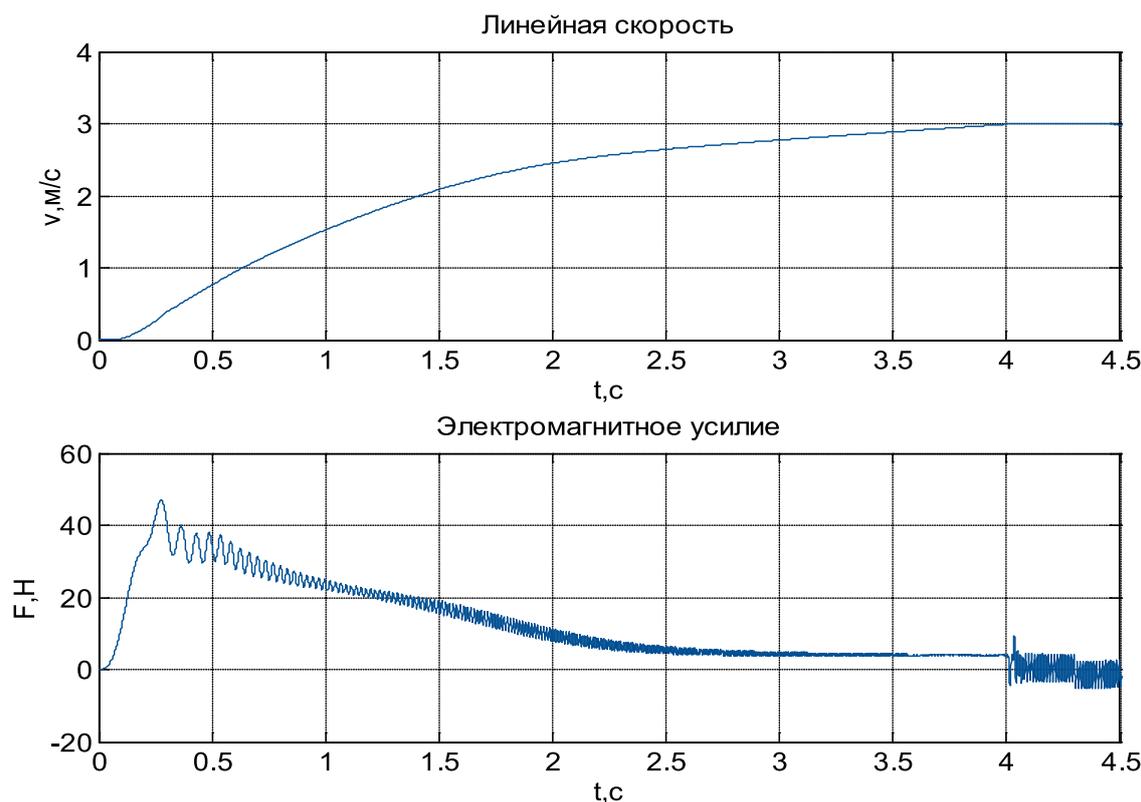


Рис. 13. Результат моделирования синхронного неявнополюсного дугостаторного двигателя в режиме частотного пуска при $r^s = 3.8$, $m = 18.2$ и с набросом нагрузки при $t > 4.3$ с

Литература:

1. Емельянов, А. А., Кобзев А. В., Козлов А. М., Бесклеткин В. В., Авдеев А. С., Киряков Г. А., Чернов М. В., Габзалилов Э. Ф. Математическая модель синхронного неявнополюсного дугостаторного двигателя ($Z1/Z2 = 6/12$) с трехфазной обмоткой индуктора с нулевым проводом // Молодой ученый. — 2014. — № 15 (74, сентябрь).
2. Веселовский, О.Н. и др. Линейные асинхронные двигатели/Веселовский О.Н., Коняев А.Ю., Сарапулов Ф.Н. — М.: Энергоатомиздат, 1991. — 256 с.
3. Сарапулов, Ф.Н., Емельянов А.А., Иваницкий С.В., Резин М.Г. Исследование электромеханических переходных процессов линейного асинхронного короткозамкнутого двигателя // Электричество. — 1982. — № 10. — с. 54–57.
4. Емельянов, А.А., Богатов Е.А., Клишин А.В., Медведев А.В., Симонович В.Г. Математическая модель линейного асинхронного двигателя на основе магнитных схем замещения // Молодой ученый. — 2010. — №5. — с. 14–22.
5. Емельянов, А. А., Медведев А. В., Богатов Е. А., Кобзев А. В., Бочкарев Ю. П. Программирование линейного асинхронного двигателя в MATLAB // Молодой ученый. — 2013. — №3. — с. 129–143.
6. Емельянов, А. А., Медведев А. В., Кобзев А. В., Козлов А. М., Бесклеткин В. В., Авдеев А. С., Киряков Г. А., Чернов М. В., Габзалилов Э. Ф., Иванин А. Ю. Программирование линейного асинхронного двигателя с числом пазов в индукторе равно шесть // Молодой ученый. — 2013. — № 10 — с. 23–38.
7. Емельянов, А. А., Медведев А. В., Кобзев А. В., Козлов А. М., Бесклеткин В. В., Авдеев А. С., Киряков Г. А., Чернов М. В., Габзалилов Э. Ф., Иванин А. Ю. Моделирование линейного асинхронного двигателя с укладкой обмотки индуктора ($Z1=6$) через спинку ярма // Молодой ученый. — 2013. — № 10 — с. 39–54.
8. Емельянов, А. А., Кобзев А. В., Козлов А. М., Бесклеткин В. В., Бочкарев Ю. П., Авдеев А. С., Киряков Г. А., Чернов М. В., Габзалилов Э. Ф., Иванин А. Ю. Программирование линейного асинхронного двигателя ($Z1 = 6$) с трехфазной обмоткой индуктора с нулевым проводом // Молодой ученый. — 2014. — №2. — с. 36–51.
9. Емельянов, А. А., Кобзев А. В., Козлов А. М., Бесклеткин В. В., Авдеев А. С., Чернов М. В., Габзалилов Э. Ф., Киряков Г. А. Моделирование системы АИН ШИМ — линейный асинхронный двигатель ($Z1 = 6$) с классическим типом обмотки с нулевым проводом // Молодой ученый. — 2014. — №6 (65, май). — с. 24–43.

Молекулярно-кинетическая теория. Внутренняя энергия тела

Медов Ислам Русланович, студент
Омский государственный технический университет

Статистическая физика и термодинамика, молекулярно-кинетическая теория. Молекулярно-кинетической теорией называется учение о строении и свойствах вещества, использующее представления о существовании атомов и молекул как наименьших частиц химического вещества. Существует два способа для того, чтобы описать процессы, которые происходят в макроскопических телах, т.е. телах, которые состоят из очень большого числа частиц — атомов и молекул, — называются статистическим и термодинамическим процессом. Статистическая физика изучает раздел физики, который посвящен, глубокому изучению свойств макроскопических тел, исходя из свойств образующих тело частиц и взаимодействий между ними. В качестве примера мы возьмем один кубический сантиметр газа при комнатной температуре и атмосферном давлении. В одном кубическом сантиметре содержится $3 \cdot 10^{19}$ молекул. Казалось бы, что, зная положение и скорость всех молекул в некоторый начальный момент времени, нам можно определить с помощью законов механики, положение и скорость каждой молекулы, а следовательно, и состояние газа в последующие моменты времени. Однако для детального описания совокупности молекул, образующих газ, потребовалось бы нам написать, а затем решить около 10^{20} уравнений движения. Если даже затратить время на написание уравнения только одну секунду, то лишь на написание уравнений без их решения, нам потребовалось бы время в 300 раз превышающее возраст нашей Вселенной. Допустим, что, если даже мы решим задачу и получим для каждого момента времени 10^{20} точных значений координат и 10^{20} точных значений компонент скоростей молекул. Статистическая физика изучает статистические закономерности. Она используется вероятностными методами и истолковывает свойства тел, которые наблюдались на опыте таких, как давление и температура.

Термодинамика изучает свойства макроскопических тел и протекающие в них процессы, не вдаваясь в микроскопическую природу тел. В отличие от статистической физики, термодинамика позволяет делать ряд выводов относительно их протекания. В основе термодинамики лежит небольшое число фундаментальных законов, которые называются началом термодинамики, установленные путем обобщения очень большого количества опытных фактов. По этой причине результаты, получаемые термодинамикой, имеют весьма общий характер.

Состояние термодинамической системы и ее процессы. Термодинамическая система — это совокупность макроскопических тел, которые могут обмениваться энергией между собой и с внешней средой, а также с другими телами. Например: жидкость и находящийся

в соприкосновении с ней пар или газ. Термодинамическая система может находиться в различных состояниях, она отличается температурой, давлением, а также объемом и плотностью. Подобные величины, которые характеризуют состояние системы — это параметры состояния. Параметры состояния не всегда имеют определенные значения. Например: у тела, подогреваемого с другой стороны и охлаждаемого с другой. Температура в разных точках будет разной, поэтому точное значение температуры мы не можем записать. Состояние, в котором хотя бы один параметр точного значения, называется неравновесным. Состояние термодинамической системы равновесное тогда, когда все параметры состояния имеют определенные значения, не изменяющиеся с течением времени. Термодинамические системы, которые не обмениваются с внешней средой ни энергией, ни веществом, называют изолированными или замкнутыми. Существует некий процесс, который называется процессом релаксации. **Процесс релаксации** это то, когда система переходит с неравновесного состояния в равновесное состояние. С латинского (relaxation) означает уменьшение, ослабление напряжения. Время, за которое первоначальное отклонение какой — либо величины уменьшается в e раз, называется **временем релаксации**. Поясню сказанное примером. Допустим, нам дан теплоизолированный цилиндрический сосуд, в нем находится газ равновесного состояния. Давление газа равно p , температура T . Вдвинем поршень резко на небольшое расстояние и сразу вернем в исходное положение. Равновесие газа будет нарушено. Давление возрастет, предположим, равное 272 Па, а температура также возрастет и примет значение 0,272 К. После вращения поршня начнется процесс релаксации.

Термодинамический процесс — это переход системы с одного состояния в другое. Такой переход всегда связан с нарушением равновесия системы. Допустим, для уменьшения объема газа, нужно вдвинуть поршень. При этом газ сожмется и повысится давление, при этом будет нарушено равновесие поршня. Равновесный процесс — это, когда состояние газа все время будет в равновесном состоянии. Бесконечно медленный процесс — это медленный процесс, когда реакции протекают медленно и значения параметров равновесного процесса пренебрежимо малы. Равновесные процессы называются также обратимыми процессами. Когда тело возвращается в исходное положение — это называется циклом.

Молекулярно-кинетические представления. Согласно молекулярно-кинетическим представлениям любое тело, находящееся в 3-х состояниях, твердом, жидком и газообразном состоит из мельчайших частиц,

называемых молекулами. Молекулы находятся в беспорядочном, хаотичном движении, их интенсивность зависит от температуры тела. Поэтому, такое движение называется тепловым движением. Доказательством теплового движения служит броуновское движение, которое открыл знаменитый английский ботаник Роберт Браун (1773–1858). В 1827 году он обнаружил беспорядочное движение видимых в микроскоп твердых частиц, которые находились в жидкости. Это движение названо броуновским, потому что молекулы находятся всегда в беспорядочном движении. Также знаменитый, великий русский ученый Михаил Васильевич Ломоносов (1711–1765). Он довел идею об атомическом строении вещества, которая была идеей древних греков. Он видел причину тепла во вращательном движении частиц тела. Таким образом, были сформулированы молекулярно-кинетические представления. Характеристики относительной атомной и молекулярной относительной массы веществ. **Относительная атомная масса** (A_r) химического элемента называется отношения массы атома этого элемента к $1/12$ массы атома углерода. **Относительной молекулярной массой** (M_r) вещества называется отношение массы молекулы этого вещества к $1/12$ массы атома углерода. Из них определения следуют, что атомная и молекулярная массы — это безразмерные величины. Масса, равная $1/12$ массы атома углерода, называется атомной единицей массы. Кроме того, число частиц, которые содержатся в моле вещества, называется постоянной Авогадро. Обозначается $N_A = 6.022 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹. Формулы для определения молярной массы, постоянной Авогадро, массы молекул, количества вещества. Формулы по которым можно найти определения ниже приведенные мною:

$M = \frac{m}{\nu}$ — формула молярной массы, где m_0 — это масса молекулы, ν — это количество вещества. Формула массы молекулы приведена ниже $m_0 = \frac{m}{N}$, где N — это число молекул вещества. Молярную массу вещества, можно выразить через массу молекулы вещества:

$M = m_0 N_A$. Количество вещества, можно найти по формуле $\nu = \frac{N}{N_A}$.

Внутренняя энергия. Одним из основных законов физики является закон сохранения энергии. При любых процессах в изолированной термодинамической системе внутренняя энергия остается неизменной. Внутренняя энергия — это сумма потенциальной энергии взаимодействия частиц, составляющих тело и кинетической энергии и их беспорядочного движения. Например, внутренняя энергия идеального газа вычисляется так:

$$U = \nu N_A \frac{3}{2} kT$$

Для того чтобы вычислить внутреннюю энергию одноатомного газа нужно подставить уравнение идеального газа:

$$U = \frac{3}{2} pV$$

Таким образом, внутренняя энергия идеального газа прямо пропорциональна произведению давления p на объем V , занимаемый газом. Существует два способа изменения внутренней энергии — теплопередача и совершение механической работы. Сумма изменений внутренней энергии равно 0. Потому что работа и количество теплоты, отрицательные.

$$U = Q + A.$$

Это выражение закона сохранения энергии и превращения энергии называется первым законом термодинамики, а если работы равны по значению, но противоположны по знаку, то первый закон будет иметь такое выражение:

$$U = Q - A$$

В неизолированной термодинамической системе изменение внутренней энергии равно разности полученным количеством теплоты и работой, которую совершает система.

Вывод: Таким образом, при помощи молекулярно-кинетической теории, мы можем узнать, из какого количества состоит тело, узнать строение молекул и атомов. Мы можем найти массу атома, любого химического элемента, вещества. Благодаря процессам определить температуру, состояние вещества. Кроме того узнали о том, что в каком то 1 см^3 , содержится $3 \cdot 10^{19}$ степени молекул. Узнали о том, что означает каждый процесс, молекулярно-кинетической теории. По каким формулам, можно найти количества вещества, массу молекулы и молярную массу вещества. Все мы это узнали в Разделе молекулярно-кинетической теории. Узнали о том, что такое внутренняя энергия, что она представляет, по каким формулам можно найти внутреннюю энергию и на какие законы она делится и правильно определяется. Если бы мы не знали о молекулярно-кинетической теории, и их не открыли наши знаменитые ученые, мы бы не имели представления о молекулах, атомах, не могли бы посчитать также массу молекулы и атома, их количество. Сейчас мы имеем представления о молекулярно-кинетической теории и внутренней энергии. Научимся решать задачи по молекулярно-кинетической теории и внутренней энергии. Под микроскопом узнаем о строении молекул и атомов. Благодаря, нашим знаменитым ученым, мы имеем представление о молекулярно-кинетической теории и внутренней энергии

Литература:

1. Кабардин, О. Ф. справочные материалы, 1988 год. [70, 72, 71, 74, 94, 96]
2. Савельев, И. В. курс физики том 1, 1989 год. [207; 209, 212, 214]
3. Мясников, С. П. пособие по физике 1976 год. [114, 117, 118, 120]

ХИМИЯ

Исследование строения фосфорилированного олефина методами ЯМР- и ИК-спектроскопии

Набиев Афиг Мехман оглы, аспирант;

Азизов Абдулсаид Абдулгамид оглы, доктор химических наук, профессор;

Алосманов Расим Мирали оглы, доктор химических наук, доцент;

Меликова Афаг Ярдым кызы, кандидат химических наук, научный сотрудник;

Буният-заде Ирада Айдын кызы, кандидат химических наук, ведущий научный сотрудник
Бакинский государственный университет (Азербайджан)

В работе представлены результаты исследования фосфорилированного децена, полученного реакцией окислительного хлорфосфорилирования децена-1 с последующим алкоголизом. С целью выяснения механизма реакции были использованы методы ЯМР и ИК анализа. В результате проведенных исследований подтверждена возможность протекания реакции окислительного хлорфосфорилирования как за счет присоединения к двойной связи, так и по атому углерода в альфа-положении к двойной связи.

Ключевые слова: децен-1, окислительное хлорфосфорилирование, ЯМР анализ, ИК анализ.

В последние годы возросший интерес к фосфорорганическим соединениям связан с возможностью использования последних в самых разных областях. Несмотря на токсичность этих соединений для человеческого организма, некоторые из них очень важны для поддержания его жизнедеятельности [1]. С другой стороны, широко известно применение фосфорсодержащих поверхностно-активных веществ, благодаря своей устойчивости в широком диапазоне температур, легкой подверженности биологическому разложению и т.д. [2]. Например, с целью получения неионогенных поверхностно-активных реагентов, обладающих нефтесобирающей и нефтесепарирующей способностью, проведено оксипропилирование одноатомных спиртов с дальнейшим фосфатированием (при помощи H_3PO_4 и P_2O_5) полученных оксипропилатов, а также осуществлено фосфатирование альфа-олефинов [3,4].

Исследование фосфорсодержащих полимеров и олигомеров наряду с фосфорорганическими соединениями представляет собой весьма насущную проблему [5]. Нами, в проведенных ранее исследованиях [4], показана возможность получения фосфорсодержащих реагентов для удаления тонкой пленочной нефти, где в качестве доступного и эффективного метода получения фосфорсодержащих олигомеров была осуществлена реакция окислительного хлорфосфорилирования альфа-олефинов под действием PCl_3 в присутствии кислорода. Было установлено, что длина углеводородного радикала играет важную роль

в эффективности полученных реагентов, что созвучно выводам, сделанным авторами в [4]. Кроме того, для управления процессом удаления пленочной нефти с водной поверхности очень важна детальная информация о строении реагента. Поэтому, целью настоящего исследования является изучение строения синтезированного реагента методами ЯМР и ИК спектроскопии.

Для проведения окислительного хлорфосфорилирования была использована трехгорлая круглодонная колба, снабженная обратным холодильником, барботером для подачи кислорода и термометром. Децен-1 был предварительно очищен вакуумной разгонкой, а кислород, используемый в эксперименте, предварительно пропускать через концентрированную серную кислоту, с целью удаления следов влаги. Скорость подачи кислорода составляла 7 л/час. В колбу приливали 4 мл децена-1, затем реакционная среда продувалась кислородом в течение 1–2 минут, после чего добавляли 2 мл PCl_3 . В зависимости от температурного режима продолжительность реакции составляла 30–35 минут. Для поддержания температурного режима процесса при 60°C, 30°C и 0°C использовали водяную баню, в которую при необходимости добавляли лед. По завершении реакции в колбу приливают 50 мл абсолютного спирта, после чего вакуумируют содержимое колбы при 40°C (остаточное давление 0.8 бар). Полученные модификаты были проанализированы методами ИК и ЯМР спектроскопии. 1H и ^{13}C ЯМР спектры образца 1, полученного окислительным хлорфосфорили-

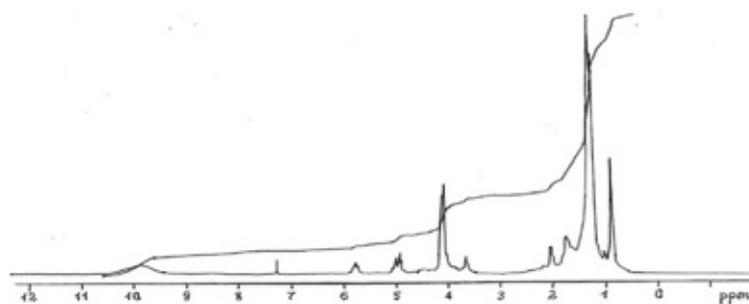


Рис. 1. ^1H ЯМР спектр фосфохлорированного децена-1

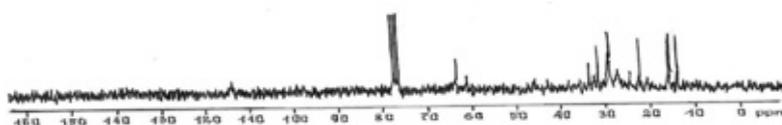


Рис. 2. ^{13}C ЯМР спектр фосфохлорированного децена-1

рованием децена-1 при температуре 60°C в течение 30 минут, представлены на рис. 1 и рис. 2. Как видно из рис. 1, сигнал на ^1H ЯМР в области 0.9 ppm соответствует CH_3 группе, в области 1.3–1.7 ppm CH_2 группам, в области 2 ppm CH_2 группе, присоединенной к атому C в — положении к двойной связи. Сигнал в области 4.9–5 ppm относится к протонам углеродного атома в — положении к двойной связи, а сигнал в области 5.8 ppm — к протонам углеродного атома в — положении к двойной связи. Сигналы в области 2.1–4.1 ppm относятся к CH-P (~2.1 ppm), CH-Cl (~3.6 ppm) и CH-O (4.1 ppm) группам; слабой интенсивности сигнал в области 10 ppm можно отнести к протонам группы $\text{PO}(\text{OC}_2\text{H}_5)_2$.

На рис. 2 представлен ^{13}C ЯМР спектр образца 1. Сигналы в области 114 и 139 ppm относятся к двойным

связям. Сигналы в других областях имеют алифатическую природу. Сигналы в области 14 и 16 ppm относятся к CH_3 группам, а присутствие групп — $\text{CH}_2\text{-CH}_2$ - (~21–39 ppm), $\text{CH-PO}(\text{OC}_2\text{H}_5)_2$ (~43–46 ppm) и CH-Cl (~61–64 ppm) подтверждается наличием сигналов в соответствующих областях.

ИК-анализ полученных образцов фосфохлорированного и, подвергнутого дальнейшему алкоголизу, децена-1, как один из самых информативных, также был использован для подтверждения структуры полученных образцов.

На ИК-спектре децена-1 (рис. 3) наблюдается полоса поглощения в области 723 cm^{-1} , соответствующая колебаниям длинноцепочечной CH_2 группе. Полоса поглощения в области 910 и 991 cm^{-1} может быть отнесена

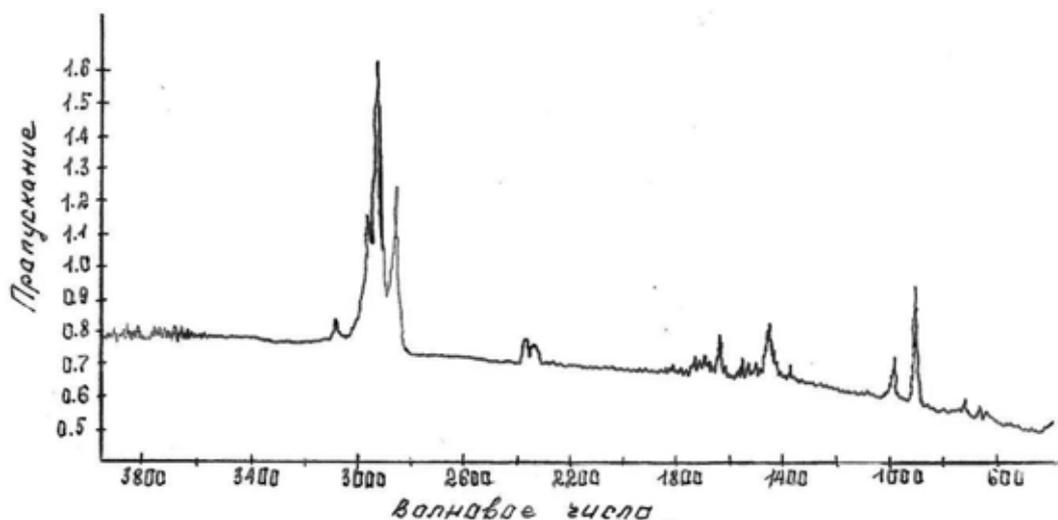


Рис. 3. ИК спектр децена-1

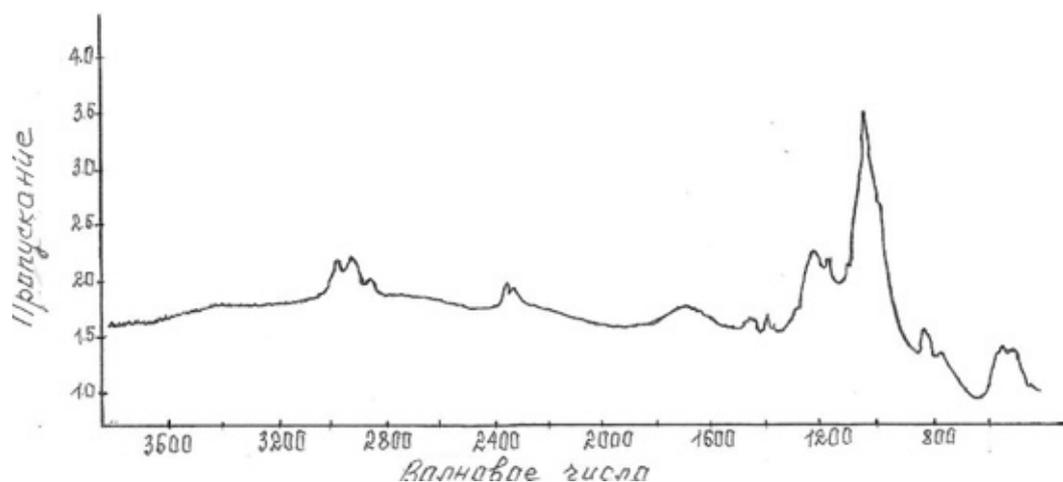


Рис. 4. ИК спектр фосфохлорированного децена-1

к внеплоскостным крутильным и плоскостным колебаниям СН группы. На спектре присутствуют также: полоса поглощения в области 1467 см^{-1} , соответствующая симметричным деформационным колебаниям CH_2 группы и полоса поглощения в области 1379 см^{-1} , отвечающая за симметричные деформационные колебания CH_3 группы. Валентным колебаниям $\text{C}=\text{C}$ связи соответствует полоса с максимумом при 1642 см^{-1} , симметричные валентные колебания с максимумом при 2856 см^{-1} и несимметричные с максимумом при 2958 см^{-1} отвечают CH_3 группе, полоса поглощения с максимумом при 2926 см^{-1} соответствует асимметричным валентным колебаниям

CH_2 группы, а наблюдаемая полоса поглощения с максимумом 3079 см^{-1} соответствует — СН группе.

На ИК-спектре образца 2 (рис. 4) наблюдается интенсивная полоса поглощения при 1037 см^{-1} , характерная для колебаний С-О-Р группы, а также полосы поглощения с максимумами при 1168 и 1228 см^{-1} , характерные для валентных колебаний Р=О группы. Полоса поглощения при 985 см^{-1} соответствует деформационным колебаниям Р- OC_2H_5 группы, а при $2861\text{—}2987\text{ см}^{-1}$ подтверждает наличие О- C_2H_5 группы. Наличие полосы поглощения в области низкочастотных длин волн можно отнести за счет присутствия С-Сl группы.

Литература:

1. Myasoedova, V. G., Tananaev I. G., Myasoedov B. F. Application of phosphorus- and nitrogen-containing organic compounds for the isolation of actinides and technetium from acid or basic aqueous solutions. *Comptes Rendus Chimie*, 2004, V. 7, Issue 12, pp. 1201–1204.
2. Furin, G. G. Phosphorus-containing nucleophiles in reactions with polyfluorinated organic compounds. *Russian Chemical Reviews*, 1993, V. 62, №3, p. 243.
3. Хардин, А. П., Тужиков О. И., Бондаренко С. Н. Фосфорилирование карбоцепных полимеров. *Успехи химии*, 1983, т. 52, №7, с. 1173–1195.
4. Магеррамов, А. М., Азизов А. А., Алосманов Р. М., Буният-заде И. А. Исследование продуктов окислительного хлорфосфорилирования альфа-олефинов (гексена, октена, децена) в качестве реагентов для удаления тонкой пленочной нефти. *Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология*. 2012, №1 (2).
5. Магеррамов, А. М., Азизов А. А., Алосманов Р. М. Фосфорорганические иониты. — Баку 2011 — 112 с.

ИНФОРМАТИКА

О способе унификации программно-алгоритмической модели многоагентных методов оптимизации на примере метода роя частиц

Блок Иван Николаевич, аспирант
Новосибирский государственный технический университет

Введение

Идея создать универсальную программно-алгоритмическую реализацию метода роя частиц возникла при исследовании его эффективности применительно к одной из NP — трудных задач. Требовалось проводить множество испытаний с различными параметрами и модификациями, при этом каждая новая версия требовала переборки программы. В связи с этим возникла идея разбить исходную задачу на модули, вынеся взаимозаменяемые функциональные части в отдельные компоненты, что значительно упростило бы разработку модификаций и исследование различных их сочетаний.

Метод роя частиц

Метод роя частиц был предложен в 1995 году Джеймсом Кеннеди (James Kennedy) и Расселом Эберхартом (Russel Eberhart) для оптимизации нелинейных функций [5]. Метод моделирует многоагентную систему, где агенты-частицы двигаются к оптимальным решениям, обмениваясь при этом информацией с соседями.

В методе роя частиц каждое потенциальное решение представлено точкой в поисковом пространстве, называемой частицей. Алгоритм метода роя частиц представляет итерационный процесс, который продолжается до тех пор, пока не будет выполнен критерий остановки. Такими критериями, например, могут быть достижение предельного числа итераций, достижение определенного значения целевой функции, сходимость алгоритма.

На первом шаге алгоритма создается множество решений, называемое популяцией. Положение i -й частицы на итерации t характеризуется D -мерным вектором координат $X_i^t = \{x_{i1}^t, x_{i2}^t, \dots, x_{iD}^t\}$ и вектором скорости $V_i^t = \{v_{i1}^t, v_{i2}^t, \dots, v_{iD}^t\}$, где D — размерность пространства решения. Кроме обмена информацией с соседями каждая частица помнит собственное наилучшее положение, т.е. обладает памятью. На каждой итерации

алгоритма направление и длина вектора скорости каждой из частиц в классическом алгоритме изменяются в соответствии со сведениями о найденных оптимумах [5]:

$$V_i^{t+1} = V_i^t + cp \cdot rnd \cdot (pbest_i^t - X_i^t) +$$

$$+ cl \cdot rnd \cdot (gbest^t - X_i^t) \quad (1),$$

$$X_i^{t+1} = X_i^t + V_i^{t+1} \quad (2),$$

где cp , cl — коэффициенты ускорения частицы, отражают стремление частицы достигнуть глобально лучшего решения, либо сохранить свое;

rnd — случайное число из интервала $[0;1]$;

$gbest^t$ — координаты лучшего решения роя, достигнутого к t -й итерации;

$pbest_i^t$ — координаты лучшего решения, достигнутого i -й частицей к t -й итерации.

Выражение $cp \cdot rnd \otimes (pbest - x_i)$ также называют когнитивным компонентом. Он определяет производительность частицы по отношению к прошлым результатам и выступает в роли индивидуальной памяти о наиболее оптимальной позиции данной частицы. Посредством этого компонента, частица может возвращаться в состояния, которые были наилучшими для нее в прошлом [2].

Выражение $cl \cdot rnd \otimes (gbest - x_i)$ называют социальным компонентом, определяет производительность частицы по отношению к соседним. Благодаря ему частица имеет возможность передвигаться в оптимальные позиции, которые были найдены соседними частицами, исследуя при этом окружающее пространство [2].

Для повышения качественных характеристик алгоритма в выражение (1) вводится коэффициент инерции w , показывающий, какую долю начальной скорости сохранит частица. Посредством этого коэффициента можно регулировать сходимость алгоритма, большие значения способствуют разлету частиц, маленькие — тщательному исследованию окрестностей частицы, целесообразно постепенное уменьшение коэффициента, благодаря этому на первых этапах работы алгоритма более равномерно

распределятся по пространству поиска, а на поздних обеспечат хорошую сходимость [3].

Кроме того, использование глобально лучшего решения $gbest$ в формуле (1) может привести к быстрой сходимости в некоторый локальный оптимум, поэтому компонент $gbest$ заменяется на $lbest$, означающий лучшее решение среди некоторого множества других частиц — соседей. Таким образом, (1) примет вид:

$$V_i^{t+1} = \omega * V_i^t + cp * rnd * (pbest_i^t - X_i^t) + cl * rnd * (lbest_i^t - X_i^t) \tag{3}$$

Пример одного шага работы алгоритма представлен на рисунке 1 [2], процесс поиска в течение нескольких итераций для некоторой функции с минимумом в точке (0,0) на рисунке 2 [1].

Программно-алгоритмическая модель

В процессе исследования алгоритма возникла задача разработки каких-либо модификаций. Внесение любого изменения требовало перекомпиляции всей программы, т.к. система роя частиц была монолитной. Для решения

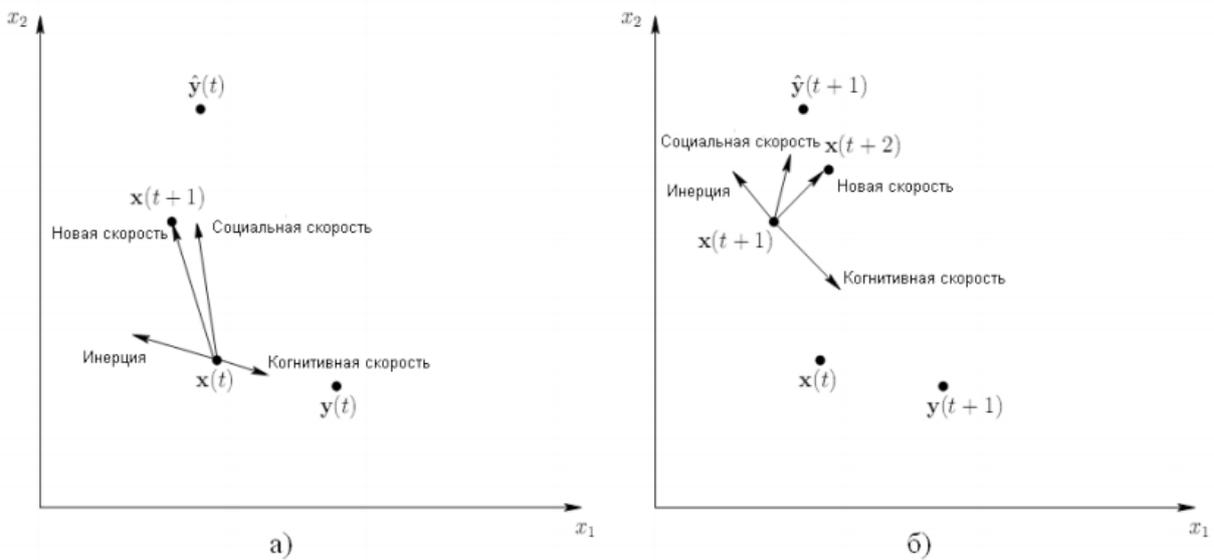


Рис. 1. Иллюстрация одного шага метода роя частиц а) момент времени t б) момент времени t+1

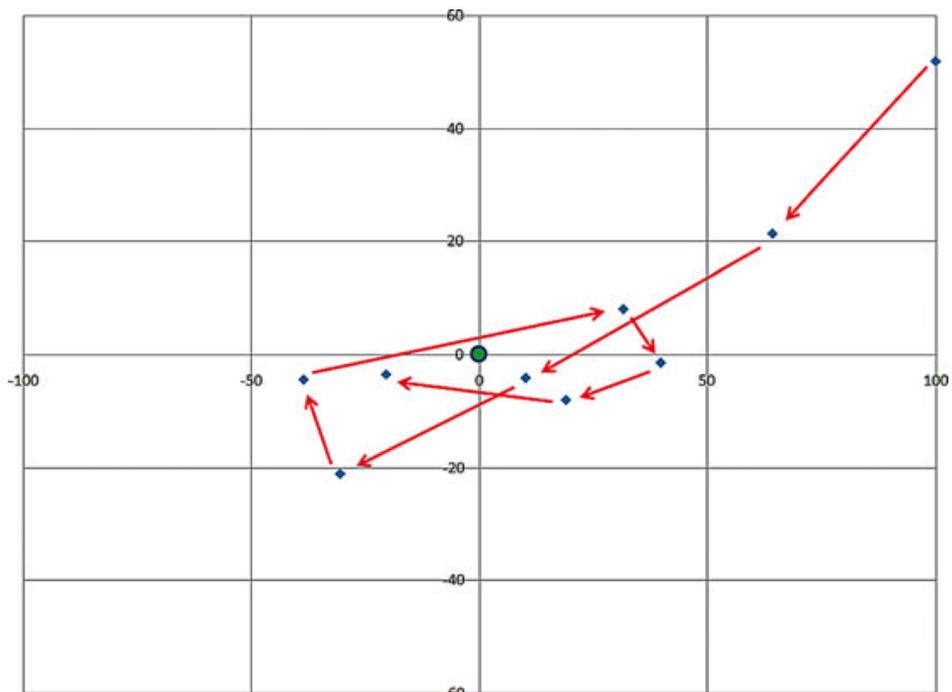


Рис. 2. Иллюстрация траектории одной частицы на примере функции с оптимумом в точке (0;0)

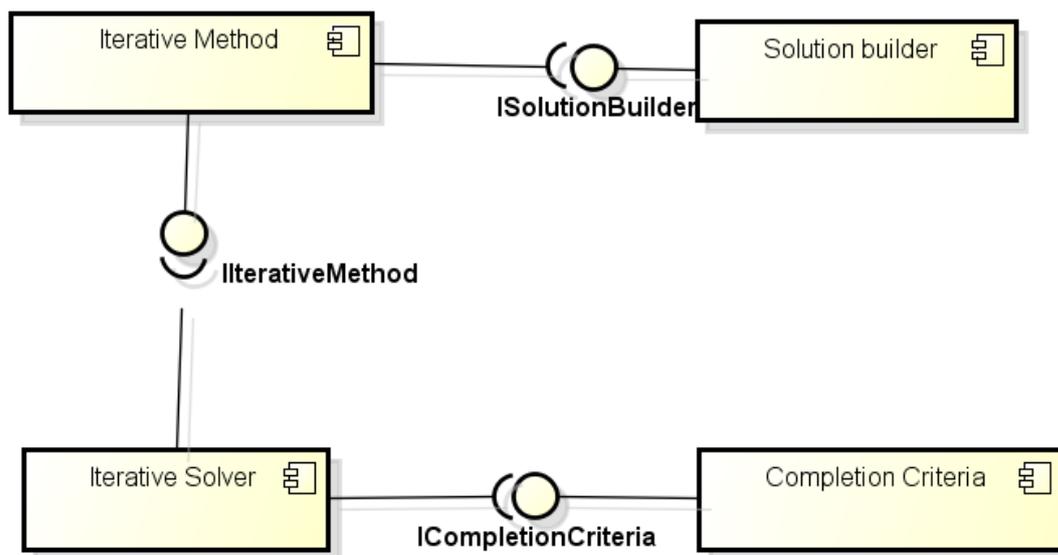


Рис. 3. Схема некоторого абстрактного решателя

этой проблемы задача была разбита на отдельные этапы, модули, выполняющие ограниченный функционал.

Применительно к некоторому классу численных итеративных методов оптимизации можно выделить следующие компоненты:

- Метод решения;
- Критерий завершения;
- Оптимизируемая задача;
- Решатель.

Рассмотрим каждый из компонентов по отдельности:

Метод решения — выполнение одного шага алгоритма, в соответствии с заданным методом. Как правило, одновременно оперирует множеством решений;

Критерий завершения — условие завершения расчетов, например достижение некоторого числа итераций, достижение требуемого значения целевой функции, отсутствие новых решений в течение длительного промежутка времени (в случае, если алгоритм сошелся);

Оптимизируемая задача — описывает процедуру расчета значения целевой функции в заданной точке \vec{X} пространства R^n ;

Решатель — производит поиск решения согласно заданным критерию завершения, искомой задаче и методу решения.

Диаграмму, связывающую компоненты можно представить схемой, изображенной на рисунке 3.

Алгоритм работы системы представлен на рисунке 4.

В соответствии с данным алгоритмом и структурной схемой, выделим основные функции, выполняемые компонентами решателя:

Метод решения:

- Start Action — инициализация, создание популяции решений;
- Iteration — выполнение одного шага алгоритма согласно заданному методу;

- Final Action — освобождение используемых ресурсов;

- Initialize — инициализация метода, передача объекта — декодера решения, оценивающего по вектору координат \vec{X} значение целевой функции F ;

- GetBestSolution — возврат лучшего найденного решения, необходим для передачи пользователю данных о найденном оптимуме.

Критерий завершения:

- Check — проверка достижения заданного критерия остановки алгоритма;

- Abort — вызов принудительной остановки алгоритма. Следующий за Abort вызов функции Check вернет true;

- Reset — сброс достигнутого прогресса для критерия завершения (например обнуление числа итераций). Следующий за Reset вызов функции Check вернет false.

Решатель:

- GetSolution — получение найденного решения;

- Initialize — инициализация решателя;

- Run — запуск вычислений.

Декодер решения:

- GetFitness — оценка решения, представляемого вектором \vec{X} ;

- GetDimSize — размерность пространства решения.

Описанная схема классов представлена на рисунке 5.

В данной работе в качестве метода решения рассматривается метод роя частиц. Ему присущи свои особенности, поэтому остановимся подробнее на реализации интерфейса IterativeMethod. Известно множество вариаций МРЧ. Выделим основные направления модификаций:

- 1) Выбор параметров — определение параметров c_r , c_l , w для каждой частицы. Параметры могут задаваться как константами, так и меняться в процессе работы, например, было показано, что уменьшение коэффициента

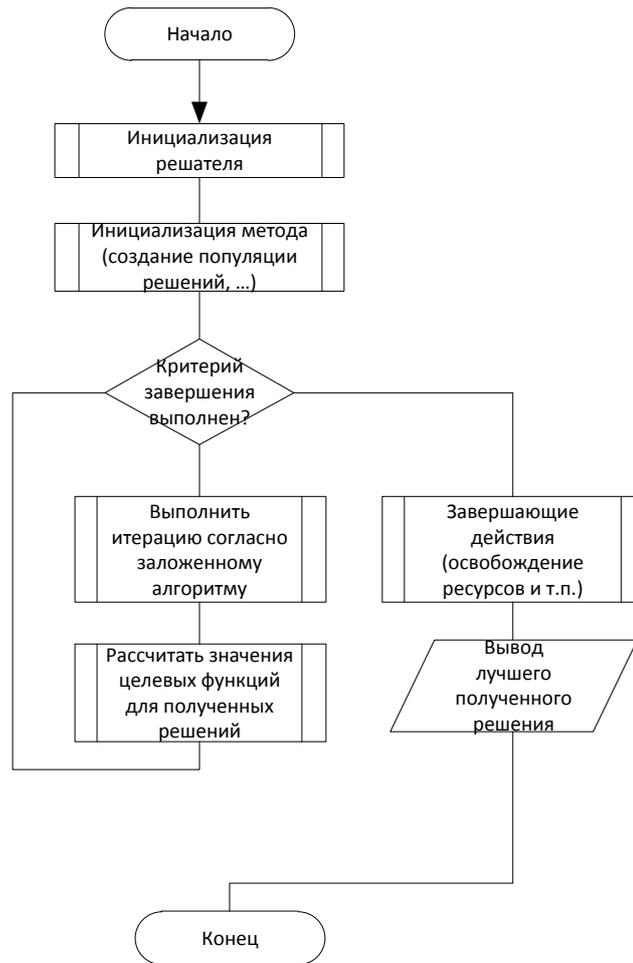


Рис. 4. Обобщенный алгоритм работы итеративного решателя

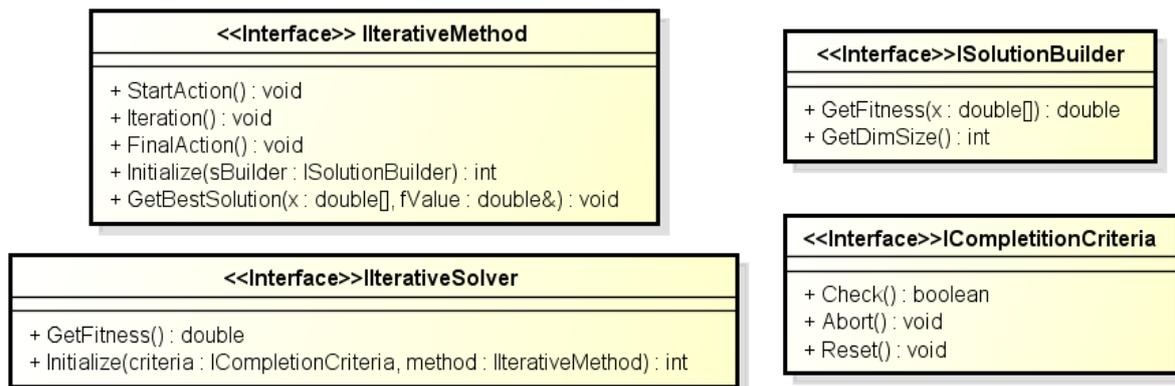


Рис. 5. Схема классов решателя

Улучшает поисковые способности алгоритма [3], кроме того, возможны варианты с адаптивной настройкой алгоритма под текущий класс задач/текущий экземпляр задачи.

2) Отношения соседства — не менее важный компонент МРЧ, от него напрямую зависит сходимость алгоритма. Реализация этого компонента позволит на одном экземпляре МРЧ исследовать различные топологии со-

седства (клика, тора, кластерные [3,4]), а также проводить кластеризацию решений по другим признакам (например, евклидово расстояние, по распределению качеств решений).

3) Расчетная формула — известно множество модификаций метода, имеющих разный подход к определению векторов скорости и координаты частицы. Производит преобразование $V^t \rightarrow V^{t+1}, X^t \rightarrow X^{t+1}$, где V, X —

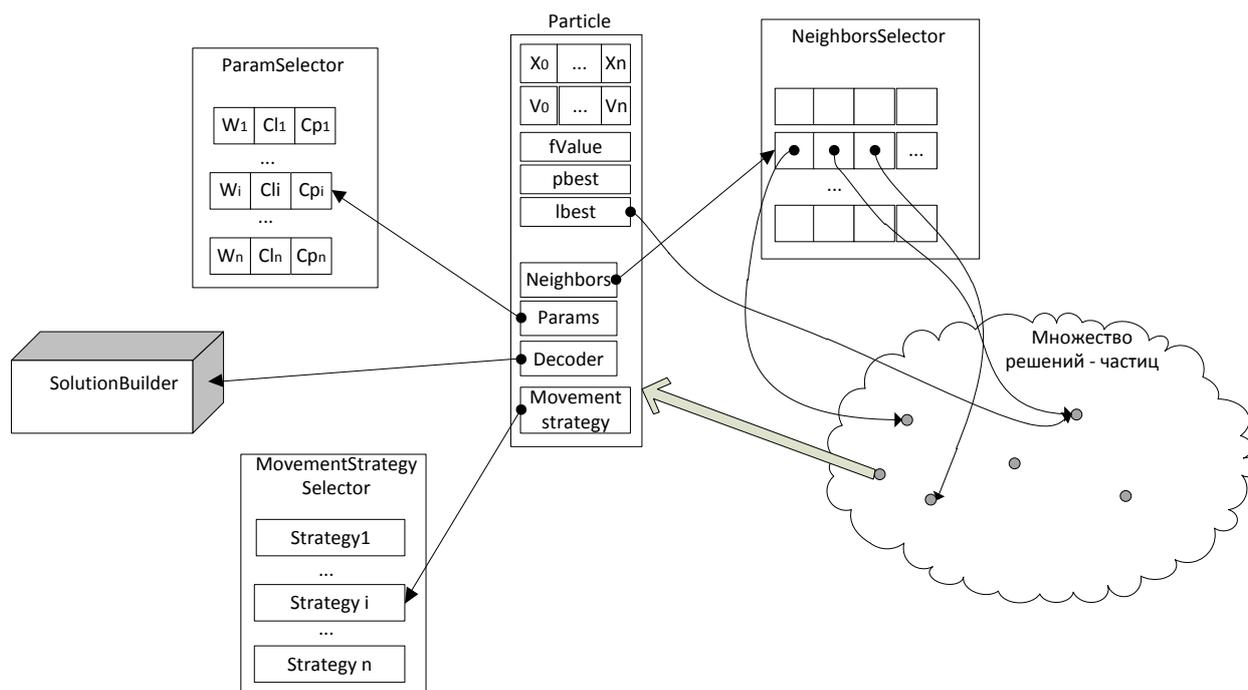


Рис. 6. Схема организации метода роя частиц

вектора скорости и координат частицы, t — номер итерации.

Очевидно, что частица не может самостоятельно управлять ни выбором своих параметров, ни выбором соседей, т. к. ей не хватает информации об окружающем пространстве. Поэтому для пунктов 1–2 целесообразно создать двухуровневую структуру, первый уровень — управляющий, второй — реализующий свою функцию с учетом информации, предоставленной 1 м уровнем. В итоге получаем схему, представленную на рисунке 6.

Видно, что при таком подходе, частица выступает только в роли контейнера — хранит требуемую информацию, поведение предопределено реализацией других модулей, начиная от видимости других частиц — списка соседей, и заканчивая использованием этой информации для перемещения в другую точку.

Селекторы выполняют управление массивом предоставленных им данных, в зависимости от текущей ситуации (распределение частиц в пространстве решений, текущей

итерации и т. п.) и заложенной стратегии. Для этого они реализуют 2 функции:

- Initialize (`_partArray: Particle [], _size: const int`) — первоначальная настройка селектора, привязка стратегий, параметров, функционала к частицам;
- Update () — обновление внутреннего состояния селектора, адаптация к внешним условиям. По умолчанию выполняется на каждой итерации.

Такой подход практически не ограничивает разработчика в реализации различных сценариев, так, посредством реализации адаптивного, самонастраивающегося ParamSelector'a можно добиться подстройки МРЧ практически под любой класс задач без дополнительного вмешательства разработчика. Реализация разных стратегий перемещения частицы позволяет присваивать частицам различные роли, что добавляет методу гибкости. С помощью NeighborsSelector'a возможен контроль сходимости алгоритма путем изменения числа связей между частицами, возможна динамическая смена топологий соседства.

Литература:

1. Маккаффри, Д. Искусственный интеллект: Метод роя частиц // Журнал MSDN Magazine Август 2011
2. Субботин, С. А., Олейник Ан. А., Олейник Ал. А. Интеллектуальные мультиагентные методы. Часть III// Фрагменты рабочих материалов монографии
3. Карпенко, А. П., Селиверстов Е. Ю. Обзор методов роя частиц для задачи глобальной оптимизации (Particle Swarm Optimization) //Наука и образование. 2009. вып. 03. URL: <http://technomag.edu.ru/doc/116072.html> (Дата обращения: 01.05.2013)
4. Антух, А. Э. Исследование канонического метода роя частиц (PSO) для топологий типа «клика» и «кластер» // Наука и образование. 2009. вып. 06. URL: <http://technomag.edu.ru/doc/127975.html> (Дата обращения: 01.05.2013)
5. Kennedy, J., Eberhart R. Particle Swarm Optimization — Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks IV. — 1995. — с. 1942–1948.

Влияние развития информационных технологий на процесс обучения

Жумагулова Сауле Комаковна, магистр, старший преподаватель
Карагандинский государственный университет им. Е. А. Букетова (Республика Казахстан)

Абилдаева Гулнур Балтабаевна, магистрант, старший преподаватель;
Шакирова Юлия Каримовна, магистр, старший преподаватель
Карагандинский государственный технический университет (Республика Казахстан)

В статье описано влияние развития информационных технологий на процесс обучения, проведены характеристики образовательных ресурсов сети Интернет. Сделан анализ тенденций использования в библиотеках современных информационных технологий. Приведен широкий спектр предлагаемых услуг в казахстанских библиотеках государственного значения. Рассмотрен процесс информатизации образования в Казахстане с внедрением компьютерных технологий в образовательную деятельность. Использование информационных средств в учебном процессе способствует повышению эффективности учебного процесса, оптимизации деятельности обучаемых.

На сегодняшний день важным условием развития человечества является информатизация образования. Для развития единой информационной образовательной среды в обществе реализуются материальные и организационные предпосылки. Данная среда является своеобразным проводником обучаемых для изучения основ информационной культуры и создает условия для развития содержания образования, модернизации инновационных технологий в образовании.

Развитие в последнее время глобальной компьютерной сети Интернет открыло новые перспективы улучшения системы образования. Во-первых, данный фактор способствовал возникновению новых требований к техническому обеспечению образовательных учреждений, их доступу к мировым информационным ресурсам, во-вторых, дал сильный толчок к развитию содержания деятельности учителя, применению им новых форм, методов и видов обучения, направленных на активную познавательную деятельность школьников, обучение в сотрудничестве, самообразование.

Связанные с процессом информатизации значительные изменения определяют новые требования к человеку сегодняшнего времени, диктуют новые задачи образования. При организации обучения информационным технологиям важно уйти от «кнопочно-технологической идеологии», речь должна идти не столько о подготовке «информационного потребителя», который может в нужное время найти нужную информацию, сколько о человеке, умеющем преобразовать информацию в систему, сравнивать ее с личным и общественно-историческим опытом и исходя из этого разрабатывать правильную и целенаправленную линию поведения.

В последнее время некоторые регионы и школы активно применяют в образовательном процессе интернет-технологии: разрабатываются телекоммуникационные проекты, вместе со школьниками учителя создают образовательные сайты, виртуальные предметные кабинеты, воплощаются в жизнь созданные учителями-энтузиастами сетевые методические объединения, проводятся уроки

с применением ресурсов Интернет, организуются теле-, видеоконференции и семинары в Интернет, чат-сессии. Развивающаяся информационная образовательная среда существенно меняет позиции участников образовательного процесса.

В содержании педагогической деятельности учителя в условиях использования Интернет-технологий получает развитие «информационная составляющая», что обуславливает формирование у учащихся общеучебных и общекультурных навыков работы с информацией.

Актуальность данного исследования обусловлена необходимостью совершенствования подготовки учителя, имеющей цель развития содержания элементов педагогической деятельности на основе использования Интернет-технологий, что является крайне актуальным в условиях современного информационного общества.

Сайт «Профильное обучение в старшей школе» (<http://www.profile-edu.kz>) содержит не только основные нормативные документы, но и интересные экспериментальные материалы по проектированию и реализации элективных курсов в разных регионах страны. Появляются новые материалы по данной теме и на сайтах издательств, электронных СМИ.

Крупнейшим электронным ресурсом в Интернете, содержащим подробное описание учебной и методической литературы для дошкольного, школьного и начального профобразования, в том числе все учебники из федеральных перечней, мультимедийные учебные пособия, новинки издательств учебной литературы, а также базы данных учебных программ, издательств, книгораспространителей, является генератор электронных учебных изданий. Он постоянно пополняется. Актуальную версию каталога можно посмотреть в Интернете по адресу: <http://e-zerde.kz/generator/standart.htm>.

Важная информация по учебной литературе содержится также на сайте Министерства образования и науки Республики Казахстан.

В Казахстане процесс информатизации образования предполагает внедрение компьютерных технологий в об-

разовательную деятельность. В электронных учебниках, обучающих учебно-методических комплексах и прочих вспомогательных инструментах образования используются мультимедиа технологии, ставшие крайне популярными и находящие все большее применение наряду с традиционными печатными учебниками. Подготовка же учебных книг к изданию в типографских условиях требует больших затрат времени, тем самым затрудняя своевременное обеспечение обучаемых учебниками, в том числе учебной литературой [1].

Достоинствами этих учебных программ являются:

- мобильность;
- доступность связи с развитием компьютерных сетей;
- адекватность уровню развития современных научных знаний.

Еще одним плюсом создания электронных учебных программ является решение и такой проблемы, как регулярное обновление информационного материала. Вместе с тем в электронных учебниках могут содержаться различные примеры и задания. Помимо этого, с помощью электронных учебных программ возможен контроль знаний — компьютерное тестирование.

Итак, развитие информационных технологий дает огромные возможности для создания новых методов и методик в образовательной деятельности и тем самым улучшить его качество.

Все эти факторы указывают на актуальность выбранной темы исследования.

Для руководства управления образованием Internet поэтапно становится одним из важнейших источников информации, весьма удобным инструментом для общения. Благодаря Интернету стала возможной передача информации непосредственно по компьютерным сетям, а также при учебных, научных и управленческих нуждах этой информацией стало возможным управлять на расстоянии. С большой уверенностью можно сказать, что в недалеком будущем все учебные заведения объединят свои компьютеры в локальные сети с возможностью выхода в Internet. Для этого все специалисты образования должны знать принципы поиска и обмена данными в сети. Неважно какая информация Вам будет необходима, в Internet Вы обязательно найдете ту информацию, которая вам нужна.

В Интернете есть большое количество ресурсов, однако не существует их официальный перечень. Этому есть ряд причин: в первую очередь, данные ресурсы огромны и их невозможно исчерпать; во-вторых, поскольку каждый желающий может в любое время создать свой новый ресурс, они обновляются и изменяются с угрожающей скоростью. Как правило, в любом указателе сетевых ресурсов в течение года устаревает около четверти сведений.

В области педагогики очень трудно описать ресурсы Internet. Сюда входят педагогические и учебные базы данных, мультимедийные учебные сервера, виртуальные образовательные учебники, всевозможная научная литература, дискуссионные группы, электронные версии пе-

риодической печати, научно-исследовательские проекты, различное педагогическое программное обеспечение и многое другое.

Не существует единого перечня педагогических конференций, семинаров, проектов. А так как размеры его огромны, невозможно привести какой-нибудь осмысленный перечень научно-педагогических и педагогических учреждений.

Интернет-технологиями называют различные виды услуг, которые представляются пользователю глобальной сети: сервис WWW, электронную почту и листы рассылки, различные поисковые системы, ICQ, чат-беседу, html-форумы, гостевые книги, телеконференции, ftp-серверы и другие виды услуг. Некоторые источники под интернет-технологиями также трактуют еще технологии ActiveX: браузеры, редактор веб-страниц FrontPage, веб-совместимый пакет Office, языки программирования VBScript, JavaScript и другие. Таким образом, Интернет-технологиями называют комплекс различных видов сетевых услуг различного вида и программных средств [2].

Ниже приведены образовательные ресурсы сети Интернет (наиболее часто используемые сайты и порталы по преподаваемому предмету):

1. www.edu.gov.kz — Официальный сайт Министерства образования и науки Республики Казахстан. В нем изложены нормативные документы Министерства образования и науки, стандарты, данные о проведении экспериментов.

2. <http://www.nauka.kz> — Научный портал. Здесь представлена информация о состоянии казахстанской науки и последних событиях в ней.

3. <http://www.mektep-rk.kz> — проект «Моя школа». Программа предназначена для использования интерактивной технологии в учебном процессе, с целью введения в образовательный процесс новой автоматизированной системы управления, обеспечивающей полную систему документооборота, статические расчеты, внутришкольную связь, связь с родителями через сеть Интернет.

4. <http://www.edu-cip.kz> — Центр международных программ Республики Казахстан. Основной деятельностью этого центра является проведение организационных мероприятий по отбору кадров для участия в международных программах, в том числе в стипендии «Болашак». Также сюда можно отнести налаживание контактов с зарубежными ВУЗами и организациями для реализации программ и проектов в сфере образования.

5. <http://www.schools.kz> — Информационный ресурс о среднем образовании в Казахстане

6. <http://www.obrazovanie.kz> — Современное образование в Казахстане — казахстанский журнал, посвященный образованию.

7. <http://www.nci.kz/> — Национальный центр информатизации образования

Интернет дает огромные возможности для изучения современных методов обучения путем анализа опыта своих коллег, которые ведут иные предметы. С помощью

сети можно не только ознакомиться с уже имеющимися формами организации и методами обучения, но и создать их новые виды. Это обусловлено, во-первых, применением Интернета в рамках традиционной классно-урочной системы обучения, во-вторых, с развитием системы дистанционного обучения.

На различных конкурсах и фестивалях представлены различные интересные поурочные планы и другие материалы методического характера. Для участия в конкурсе все учителя стремятся подать лучшие свои разработки. Используя такое широкое разнообразие уроков, можно создавать новые интересные уроки по технологии.

Помимо этого, такие конкурсы привлекают еще и тем, что можно использовать дидактические методы педагогов, преподающих другие предметы.

Выявить, какие из проводимых конкурсов является лучшим, не представляется возможным, так как их количество огромно, и каждый из них имеет свою цель.

К примеру, традицией стало проведение конкурса «Лучший педагог». Информацию о конкурсах можно посмотреть на сайте Министерства образования и науки РК [3], на сайтах педагогических СМИ, например на сайте информационно-методического журнала «Открытая школа».

С 2001–2002 учебного года республиканский научно-практический центр «Дарын» г. Алматы при поддержке Министерства образования и науки РК проводит «Фестиваль инновационно-педагогических идей». Его цель — совершенствование учебно-методической работы в учреждениях образования, укрепление связей науки с психолого-педагогической практикой, распространение лучшего опыта, внедрение инновационных технологий и повышение профессионально-личностной готовности учителей к работе с одаренными детьми.

Участниками фестиваля могут быть не только учителя школ, но и воспитатели организаций дошкольного образования, дополнительного образования, методисты областных институтов повышения квалификации и переподготовки педагогических кадров, занимающиеся инновационной деятельностью не менее трех лет». Все материалы фестиваля опубликованы в открытом виде на сайте.

Интересной и полезной является работа казахстанских августовских Интернет-педсоветов, которые проводятся с 2008 года, перед началом нового учебного года в он-лайн режиме на сайте. В предметных секциях были заслушаны доклады, методические разработки участников Интернет-педсовета.

Последнее время интерес педагогов вызывает научно-исследовательская деятельность. Интернет дает для этого огромные возможности. Обычно, данные о наиболее значительных научных конференциях распространяются посредством объявлений на сайтах или электронной почты. Иногда конференции проводятся и в обычном реальном, и в электронном режиме. Сетевые конференции также стали частым явлением.

Используя Интернет-магазины, можно с легкостью выбрать и заказать современную научно-методическую литературу и получить ее по почте наложенным платежом. С помощью некоторых поисковых служб можно искать книги в базах данных сразу нескольких книжных магазинов.

Сегодня все больше применяются новые информационно-коммуникационные технологии. Среди них не последнее место занимают библиотеки. Они получили название виртуальные, или электронные библиотеки. В таких библиотеках определенная часть информационного фонда после цифровой обработки становится доступными посредством сети или дисков. Для работы с читателями существует специально подготовленный персонал, который применяет в своей работе современные информационные технологии.

В таких виртуальных библиотеках можно работать с каталогами, имеется доступ к материалам в электронном виде (оцифрованным книгам, журналам, иллюстрациям и т.д.), картинам, анимациям, аудио и видеофайлам и прочее. При этом в основном каталоги и электронные материалы предлагаются безвозмездно.

Учеными отмечен ряд существенных изменений, появившихся в результате использования в библиотеках современных информационных технологий. Ниже сделан анализ этих тенденций.

1) Налицо перспективы снижения стоимости распространения нормативной, учебной, методической информации путем применения технологий Интернета. Электронные учебники, будь то малотиражные, а потому малорентабельные издания могут найти своего читателя и в итоге иметь положительный практический эффект.

2) Намного уменьшатся временные затраты поступления необходимой информации до ее потребителей.

3) Увеличится емкость хранилищ, которым иногда не хватает площадей и специального оборудования.

4) Благодаря оцифровке расширится доступ к редким источникам.

5) Все интенсивнее распространяются инновационная информация, передовой педагогический опыт. Можно бесплатно работать с каталогами крупнейших государственных, региональных и университетских библиотек и отслеживать необходимую информацию о современных публикациях.

6) Регулярно расширяется возможность получения быстрого доступа ко всем имеющимся в мире данным. Независимо от своего географического расположения пользователи в любое время и в любом месте имеют возможность работать в электронных библиотеках.

Все это, несомненно, повышает интерес педагога к преподавательской и научно-исследовательской деятельности.

Несмотря на все эти проблемы, только в русскоязычной части Интернета количество заметных электронных библиотек составляет уже несколько сотен, хотя

не все из них регулярно пополняются новыми материалами.

То, какие материалы, полезные для учителя, можно найти в режиме свободного доступа в отечественных электронных библиотеках, во многом зависит от статуса и финансирования библиотеки, ее связей с научными центрами.

Наибольшее количество достоверных электронных материалов и широкий спектр предлагаемых услуг среди электронных казахстанских библиотек имеется в библиотеках государственного значения.

Самой крупной казахстанской библиотекой является Казахская национальная электронная библиотека. На сайте библиотеки (<http://www.kazneb.kz>) возможна бесплатная работа с каталогами. Казахская национальная электронная библиотека формирует фонды Открытой Электронной библиотеки, рассматривая эту работу как служение духовному возрождению нации. В качестве приоритетов названы история и культура Казахстана, история и культура Казахстана, школьная литература, школьные учебники, диссертации и словари.

Большую помощь в профессиональной деятельности учителей может оказать Научная библиотека ON-LINE ВКГУ им. А. С. Аманжолова [4]. Здесь имеются различные энциклопедии, словари, монографии, отечественные и зарубежные газеты и журналы и множество других материалов. Постоянно обновляется набор ссылок на педагогические ресурсы сети.

Информатизацией образования является процесс активного внедрения в педагогическую деятельность психолого-педагогических разработок, которые позволяют интенсифицировать учебный процесс по любому предмету. Привлекательность компьютера ещё не обеспечивает

устойчивого интереса к нему и к деятельности, связанной с его использованием. Крайне необходимо регулярно искать возможности поддержания интереса в самом содержании учебного материала и в совершенствовании методики преподавания. Посещая различные сайты, школьник могут «путешествовать» по различным материкам и странам, по океанам и морям, увидеть водопады.

Моделирование с применением компьютера всевозможных ситуаций создаёт неограниченные возможности для нравственного воспитания, одного из важнейших аспектов гуманитаризации естественнонаучных дисциплин, к примеру, через решение проблем по выяснению причин и устранению смоделированных загрязнений окружающей среды мусорными отходами, кислотных дождей, разливов нефти в море.

Применение Интернет-технологий порождает динамичный познавательный интерес у многих обучаемых, часто переходящих в проектно-исследовательскую деятельность по конкретным темам и разделам. Как показывают результаты исследований, использование информационных средств в учебном процессе способствует повышению эффективности учебного процесса, оптимизации деятельности обучаемых. Применение Интернет увеличивает познавательную активность ребят, делает учебный процесс ярче и интереснее. Благодаря использованию в образовательном процессе Интернет-технологий появляется новая возможность создания и применения картографического материала, где карта создается непосредственно на уроке. Использование компьютерных технологий способствует индивидуальным темпам усвоения материала. Работа с компьютером вызывает у учеников повышенный интерес и усиливает мотивацию обучения.

Литература:

1. Субботин, М. М. Новая информационная технология: Создание и обработка гипертекстов. — М.: ООО «Вершина», 2004. — 755 с.
2. Роберт, И. В. Современные информационные технологии в образовании: дидактические проблемы; перспективы использования. — М.: «Школа-Пресс», 1994. — 205 с.
3. <http://www.edu.gov.kz>
4. <http://library.vkgu.kz>

Системы поддержки принятия решений для мониторинга работы ЛВС

Хромов Дмитрий Олегович, аспирант
Вологодский государственный университет

В настоящее время при разработке локально вычислительных сетей актуальным вопросом остается создание систем контроля ее работы. Развитие информационных технологий должным образом обеспечивает появление новых концепций в решении данного вопроса.

В частности, одним из вариантов может послужить создание системы поддержки принятия решений.

Развитие компьютерных технологий и достижение в области нейрофизиологии сделали возможным реализацию на компьютере некоторых простейших функций че-

ловеческого мозга. Однако целью данных исследований является не замена человека компьютером, а создание высокоэффективного симбиоза человека и компьютера, снабженного необходимыми знаниями, методами и моделями.

Сила человека — в его знании предмета исследования, понимании и использовании контекста, в котором проводится исследование, в интуиции, чувстве правильного решения, аудиовизуальных возможностях, творчестве и т. д. Сила компьютера — это его вычислительная мощность, легкость, с которой он производит огромное число операций, значительно превосходящая в этом отношении возможности человека. Правильно использованная мощность компьютера существенно увеличивает интеллектуальную силу человека, осуществляя для него необходимый детальный анализ, помогает избежать многих интуитивно не обнаруживаемых ловушек, связанных со сложностью систем.

Система поддержки принятия решений (СППР) связывает интеллектуальные ресурсы управленца со способностями и возможностями компьютера для улучшения качества решений.

Данная система будет решать 2 основные задачи: выбор лучшего решения из возможных (оптимизация), упорядочение возможных решений по предпочтительности (ранжирование). В обеих задачах первым и наиболее принципиальным моментом является выбор совокупности критериев, на основе которых в дальнейшем будут оцениваться и сопоставляться возможные решения (будем называть их также альтернативами). Система СППР помогает пользователю сделать такой выбор.

Интеллектуальная СППР — это компьютерная система, состоящая из следующих пяти основных взаимодействующих компонентов:

- языковая подсистема (механизм обеспечения связи между пользователем и другими компонентами интеллектуальной СППР);
- информационная подсистема (хранилище данных и средств их обработки). Состоит из БД, системы управления БД, средств организации запросов, справочника данных, внешних источников данных;
- подсистема знаний (хранилище знаний о проблемной области, таких как процедуры, эвристики и правила, средства обработки знаний);
- подсистема моделей (хранилище моделей, языки моделирования, средства управления моделированием). Состоит из базы моделей, системы управления моделями, языков моделирования, справочника моделей и процессора, который осуществляет реализации на модели, интегрирует модели и руководит процессом моделирования;
- подсистема обработки и решения задач (связующее звено между другими системами). Подсистема обработки и решения задач реализует свои отдельные специфические функции в их рамках. Эта подсистема обладает основными способностями по манипуляции и обработке задавая для принятия решений.

В той или иной степени Системы Поддержки Принятия Решений (СППР) присутствуют в любой информационной системе (ИС). Поэтому, осознанно или нет, к задаче создания системы поддержки принятия решений организации приступают сразу после приобретения вычислительной техники и установки программного обеспечения. По мере развития бизнеса, упорядочения структуры организации и налаживания межкорпоративных связей, проблема разработки и внедрения СППР становится особенно актуальной. Одним из подходов к созданию таких систем стало использование хранилищ данных.

Для определения основных концепций построения СППР были выделены следующие квалификационные группы:

По взаимодействию с пользователем выделяют три вида СППР:

- пассивные помогают в процессе принятия решений, но не могут выдвинуть конкретного предложения;
- активные непосредственно участвуют в разработке правильного решения;
- кооперативные предполагают взаимодействие СППР с пользователем. Выдвинутое системой предложение пользователь может доработать, усовершенствовать, а затем отправить обратно в систему для проверки. После этого предложение вновь представляется пользователю, и так до тех пор, пока он не одобрит решение.

По способу поддержки различают:

- модельно-ориентированные СППР, используют в работе доступ к статистическим, финансовым или иным моделям;
- СППР, основанные на коммуникациях, поддерживают работу двух и более пользователей, занимающихся общей задачей;
- СППР, ориентированные на данные, имеют доступ к временным рядам организации. Они используют в работе не только внутренние, но и внешние данные;
- СППР, ориентированные на документы, манипулируют неструктурированной информацией, заключенной в различных электронных форматах;
- СППР, ориентированные на знания, предоставляют специализированные решения проблем, основанные на фактах.

По сфере использования выделяют общесистемные и настольные СППР. Общесистемные работают с большими ХД и применяются многими пользователями. Настольные являются небольшими системами и подходят для управления с персонального компьютера одного пользователя.

Для решения задач мониторинга работы сети было предложено проектирование кооперативной модели СППР, ориентированные на знания. Также исходя из источников было предложено основываться на архитектуре системы с независимой витриной данных.

В самом простом варианте для Хранилищ Данных используется та модель данных, которая лежит в основе транзакционной системы. Если, как это часто бывает,

транзакционная система функционирует на реляционной СУБД (Oracle, Informix, Sybase и т. п.), самой сложной задачей становится выполнение запросов ad-hoc, поскольку невозможно заранее оптимизировать структуру БД так, чтобы все запросы работали эффективно.

Однако практика принятия решений показала, что существует зависимость между частотой запросов и степенью агрегированности данных, с которыми запросы оперируют, а именно чем более агрегированными являются данные, тем чаще запрос выполняется. Другими словами, круг пользователей, работающих с обобщенными данными, шире, чем тот, для которого нужны детальные данные. Это наблюдение легло в основу подхода к поиску и выборке данных, называемого Оперативной Аналитической Обработкой (On-line Analytical Processing, OLAP).

В основе OLAP лежит понятие гиперкуба, или многомерного куба данных, в ячейках которого хранятся анализируемые (числовые) данные. Измерения представляют

собой совокупности значений других данных. Дальнейшее усложнение модели данных может идти по нескольким направлениям:

— увеличение числа измерений — данные о продажах не только по месяцам и товарам, но и по регионам. В этом случае куб становится трехмерным;

— усложнение содержимого ячейки — например нас может интересовать не только уровень продаж, но и, скажем, чистая прибыль или остаток на складе. В этом случае в ячейке будет несколько значений;

— введение иерархии в пределах одного измерения — общее понятие ВРЕМЯ естественным образом связано с иерархией значений: год состоит из кварталов, квартал из месяцев и т. д.

Внедрение данной системы не позволит полностью работу администратора сети, но позволит весьма существенно минимизировать время затраченное на решение определенных задач.

Литература:

1. Борисов, А. Н. Методическое обеспечение технологии принятия решений. Системы обработки знаний в автоматизированном проектировании/А. Н. Борисов. — Рига: Риж. техн. ун-т. 1992. — с. 12–15.
2. Терелянский, П. В. Информационные технологии прогнозирования технических решений на основе иерархических моделей: Монография/А. В. Андрейчиков, П. В. Терелянский, О. Н. Андрейчикова. — Волгоград: ВолгГТУ, 2004. — 156 с.

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Контроль процесса пневмодробеструйного упрочнения и технологическая оснастка

Ахтамянов Рамиль Маратович, студент
Московский физико-технический институт

В данной статье проведен анализ к технологическому процессу ПДУ согласно международным стандартам. Описано технологическое оборудование, режимы обработки, методы контроля, технологическая оснастка.

Ключевые слова: пневмодробеструйное упрочнение, технологическая оснастка, контроль процесса упрочнения.

Основные термины и аббревиатуры

Поверхностное пластическое деформирование (ППД) — обработка давлением, при которой пластически деформируется только поверхностный слой детали (термины и определения по ГОСТ 18296). [1]

Пневмодробеструйное упрочнение (ПДУ) — процесс ППД, где в качестве движителя дробы используется сжатый воздух.

1. Анализ технологических требований к процессу ПДУ

Качество воздуха и дробы

При подаче сжатого воздуха система должна обеспечить защиту от попадания масла воды и других загрязнений.

Система должна иметь устройство обеспечения сортировки всего объема дробы по размеру и исключения попадания сломанной дробы и пыли. Возврат дробы надлежащего размера с гарантией качества не менее 80 %.

Требование к дробы и поверхности

При обработке используется типоразмер дробы фракцией 0,5–0,85 мм (аналог S230 [2] по стандарту ASTM E11–04).

Максимальная шероховатость упрочненной дробью поверхности должна быть не выше $Ra=3,2$ мкм [2].

Технологические режимы

Режим ПДУ

Давление воздуха атм.	Расход дробы*, кг/сек	Расстояние от среза сопла до детали, мм	Положение сопла относительно обдуваемой поверхности, °	Интенсивность упрочнения для титановых сплавов, мм
2–4	8–11	100–200	70°–90°	0,2–0,3

* — Расход дробы определяется при помощи расходомера в течении 15 сек.

Контроль процесса упрочнения

Визуальный контроль:

- отсутствие вкраплений дробы;
- отсутствие парезов, вызванных отломившимися частичками;
- отсутствие механического повреждения.

2. Контроль режимов обработки записанных в ПК.

3. По образцам — пластинам Almen (см. рис. 1.1;1,2;1.3). Прибор и пластины должны соответствовать стандарту SAE J442 [3]. Пластины изготавливаются из стали 30ХГСА с пределом прочности $120+/-10$ кгс/мм², или 30ХГСНА с пределом прочности $170+/-10$ кгс/мм².



Рис. 1.1. Современные приборы TSP-3 для измерения интенсивности Almen согласно стандарту SAE J442



Рис. 1.2. Устаревший прибор.
Позиция 1 индикатор на 0 мм



Рис. 1.3. Позиция 2 индикатор на 2,5 мм,
что соответствует требованиям ТП

Для обеспечения требований PCS-2300 по контролю интенсивности прогиба пластин Almen необходимо использовать прибор типа TSP-3 с обеспечением считывания до 0,0254 мм или 0,001 дюйма.

Недостатки ПДУ: высокие локальные мгновенные температуры (600–750°C), приводящие к созданию значительного подслоного максимума сжимающих остаточных напряжений, увеличение шероховатости поверхности деталей; ускоренный износ сопел, дроби и деталей камеры; наличие металлической пыли [1].

Технологическая оснастка процесса ПДУ

Основной конструктивной особенностью деталей семейства «Кронштейн» является схема базирования по двум отверстиям и базовой плоскости.

Для снижения времени процесса пневмодробеструйного упрочнения, спроектирована оснастка позволяющая обработать деталь за два установка. Предлагаемая оснастка обеспечивает базирование и закрепление детали по двум отверстиям, тем самым предоставляет доступность сопла ко всем обрабатываемым поверхностям под углом не менее 70°.

При базирование детали за отверстия, используется цанговый палец, спроектированный таким образом, что все резьбовые соединения защищены от попадания дроби, обеспечивая возможность многократного использования оснастки. Также палец обеспечивает необходимую силу зажима, увеличивает доступность поверхностей детали для рабочего инструмента при обработке и контроле, сокращает объем материала используемую на оснастку по сравнению с классическим закреплением детали (см. рис. 2).

Сверху выделен винт, имеющий конусное сечение, фиолетовым натяжная втулка, зеленым цветом цанговый палец.

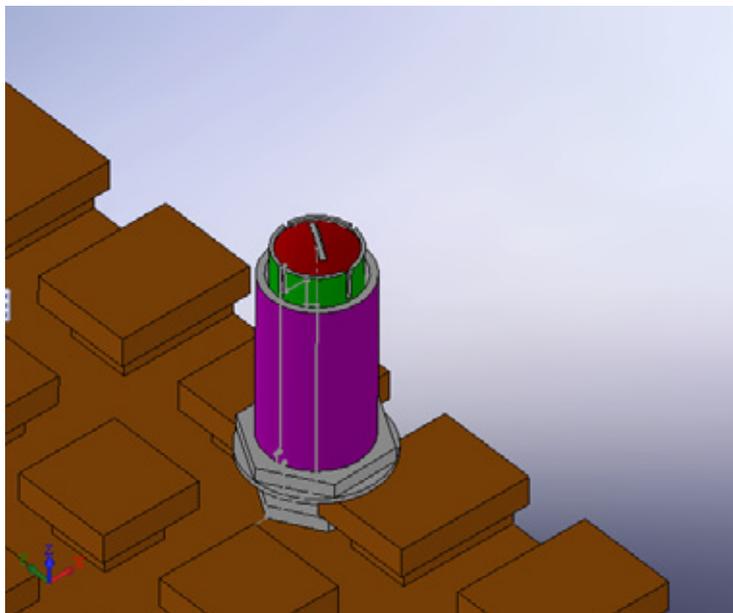


Рис. 2. Система крепления за отверстие с помощью цангового пальца для процесса пневмодробеструйного упрочнения

Литература:

1. Справочник технолога-машиностроителя Т. 2/Под ред. А. М. Дульского, А. Г. Сулова, А. Г. Косиловой — 5-е изд., перераб. И доп. — М.: Машиностроение-1, 2001 г. 944 с. 481–521;
2. PCS-230, с. 1–17;
3. http://www.electronics-inc.com/uploads/data_sheets_installation_manuals/almen/im0060_ru

Растительные компоненты в рецептуре мясного хлеба с точки зрения функционального питания

Бажина Ксения Анатольевна, студент

Магнитогорский государственный технический университет имени И. Г. Носова (Челябинская обл.)

Гаврилова Евгения Владимировна, магистрант

Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет) (г. Челябинск)

В данной статье рассматривается роль растительных компонентов, добавляемых в мясной хлеб, с точки зрения функционального питания потребителей. Проведен литературный обзор с целью выявления потенциальных источников растительного сырья для введения в рецептуру мясного хлеба.

Ключевые слова: мясной хлеб, функциональное питание, функциональные продукты, растительные компоненты.

В связи с увеличением доходов населения растет спрос на более дорогие мясные продукты или деликатесы, такие например, как мясной хлеб.

Как известно, организму современного человека, а тем более проживающего в крупном городе, для хорошего самочувствия необходимо в день потреблять целый набор витаминов и минеральных веществ, которых в повседневной пище недостаточно. Естественным продуктом, содержащим комплекс полноценных белков и других эссенциальных веществ, являются мясные хлеба [1].

С технологической точки зрения мясной хлеб — это вовсе не хлеб, а блюдо, изготовленное на основе мясного фарша или рубленого мяса, которое сформовано в виде буханки хлеба. Именно поэтому мясной хлеб и носит такое необычное название.

В качестве основы для приготовления мясного хлеба может использоваться практически любой вид мяса: свинина, говядина, телятина, мясо ягненка, оленина или мясо птицы. Рубленое мясо или фарш смешивается с разнообразными начинками, в качестве которых в основном выступают отварные яйца, хлебобулочные изделия, размоченные в жидкости (молоке, воде или красном вине).

Учитывая экологическую обстановку и массовое применение антибиотиков потребители нуждаются в продуктах функциональной направленности. Российские граждане на сегодняшний день отдают все большее предпочтение полезным продуктам, которые помогают улучшить состояние здоровья. Многочисленные исследования, проведенные в мире за последние годы, подтверждают, что такие компоненты продуктов питания, как витамины, минералы, жиры и пищевые волокна непосредственно влияют на здоровье человека.

Анализ динамики потребления пищевых продуктов в РФ за последнее десятилетие показал, что доля функциональных продуктов в структуре рациона питания россиян возросла, и продолжает увеличиваться, что связано с популяризацией здорового питания [2].

Необходимо развитие новой системы в стране, которая была бы направлена на то, чтобы продвигать производство

продуктов питания, нацеленных на решение серьезных проблем со здоровьем. Известно, что функциональное питание является альтернативой медикаментозной терапии. Оно позволяет не только сохранить здоровье, но и в определенной мере заменить лекарственные препараты. При помощи профилактического питания можно снизить количество заболеваний, связанных со старением на 80%, диабетом — на 50%, сердца — на 25%, органов зрения — на 20% [3].

Функциональное питание, в отличие от иррационального — это стиль питания «для того, чтобы жить», адаптированный к современным возможностям, условиям и привычкам. Оно, с одной стороны, целенаправленно воспроизводит счастливое стечение обстоятельств, с которыми повезло нашим предкам, с другой учитывает пол, возраст и интенсивность профессиональных нагрузок, современную технологию выращивания и приготовления продуктов и, наконец, в сочетании с пищевыми добавками компенсирует недостаток питательных элементов, необходимых для абсолютного здоровья и долголетия [4].

Современное общество предъявляет следующие требования к функциональным продуктам:

- должны быть удобными в приготовлении и употреблении;
- состав включает вещества природного происхождения;
- должны оказывать определенное действие на организм;
- хорошее усвоение организмом.

Использование в технологии комбинированных мясных продуктов растительных компонентов обеспечивает высокую пищевую и биологическую ценность, способствуют повышению гибкости рецептур, устойчивому и равномерному распределению ингредиентов, минимизации потерь в процессе производства, что в конечном итоге приводит к созданию продукта стабильного качества. Внесение в мясной фарш сырья растительного происхождения можно рассматривать как один из способов получения высококачественных мясных продуктов с ре-

гулируемыми свойствами. Существует много различных видов растительного сырья, с помощью которого можно создать комбинированный продукт [5].

Посредством введения в рецептуры растительных компонентов можно повысить полезные свойства мясного хлеба. Например, добавление в состав мясного хлеба миндальной, гречневой, овсяной или любой другой растительной муки только придаст фаршу тестообразное состояние, но и способствует повышению содержания пищевых волокон [6].

Представляется перспективным использование кукурузной муки, которая является ценным диетическим продуктом, обладающим многими полезными свойствами и целебным воздействием на организм человека. Кукурузная мука — хорошее средство от малокровия, стимулирует желчевыделение и перистальтику кишечника, обладает и мочегонными свойствами.

Ученые считают, что кукурузная мука способствует нормализации кровообращения, укреплению сердечно-сосудистой системы, замедлению процессов старения. Она выводит из организма жировые накопления, а наличие в ней микроэлементов способствует повышению эластичности кровеносных сосудов и укреплению зубов.

Результаты исследований, приведенных в литературе, свидетельствуют о том, что положительная роль плодового пюре заключается в обогащении мясного хлеба пищевыми волокнами, витаминами (каротин, токоферол, аскорбиновая и никотиновая кислоты). Для стабилизации функционально-технологических свойств мясного фарша с добавлением плодового пюре рекомендуют использовать

биологические жидкости с высоким рН или его стабилизаторы [7].

Применение различных функционально-технологических пищевых добавок и растительных компонентов белковой и углеводной природы помогают достигать необходимые характеристики вырабатываемых мясных изделий, изменяя свойства сырья и готовых продуктов. Благодаря их использованию можно снизить себестоимость выпускаемой продукции и увеличить ее выход, а, следовательно, повысить конкурентоспособность производителя в жестких условиях рынка.

Использование растительного сырья при производстве мясопродуктов позволяет не только обогатить их биологически активными веществами, но и нормализовать кислотность в организме человека, повысить усвояемость, что способствует адаптации людей вредному воздействию окружающей среды [8].

Одним из вариантов расширения ассортимента мясной продукции за счет улучшения вкусоароматических свойств является использование в рецептурах экстрактов различных растений [9].

Широкий ассортимент мясных хлебов предусматривает различные добавки в рецептуре, которые позволяют приобрести покупателю продукцию на любой вкус. Популярности этой группы способствует гармонично сочетающиеся форма, вкус, аромат и цвет — то, что специалисты пищевой индустрии называют органолептическими свойствами. С учетом этих характеристик продукт становится полноценным, соответствует своему названию, пользуется спросом.

Литература:

1. Фролова, Е. А. Актуальность производства мясного хлеба на предприятиях Великого Новгорода. // Новгородский университет имени Ярослава Мудрого. — с. 3.
2. Ребезов, М. Б. Анализ рынка функциональных безалкогольных продуктов (на примере города Челябинска)/М. Б. Ребезов, Н. Л. Наумова, С. А. Комаров, Р. В. Залилов, О. В. Зинина // Пиво и напитки — 2011. — № 4. — с. 4–6.
3. Альхамова, Г. К. Продукты функционального назначения/Г. К. Альхамова, А. Н. Мазаев, Я. М. Ребезов, И. А. Шель, О. В. Зинина // Молодой ученый. — 2014. — № 12 (71). — с. 62–65.
4. Монастырский, К. Функциональное питание. — 2002. — с. 19.
5. Гаврилова, Е. В. Органолептическая оценка полуфабрикатов мясных рубленых с растительными компонентами/Е. В. Гаврилова, К. А. Бажина // Молодой ученый. — 2013. — № 11. — с. 84–86.
6. Дудкин, М. С. Пищевые волокна/М. С. Дудкин, Н. К. Черно // Киев: Урожай. — 1988. — с. 152.
7. Исакова, Д. Б. Использование растительного сырья при производстве мясопродуктов/Д. Б. Исаков, Ч. О. Райимкулова // Докл. Международной научно-технической конференции «Инновации в образовании, науке и технике», посвященной 100-летию первого ректора ФПИ-КГТУ проф. Сухомлинова Г. А. — Бишкек. — 2006. — с. 150.
8. Асенова, Б. К. Технология производства функциональных продуктов питания для экологически неблагоприятных регионов/Б. К. Асенова, К. Ж. Амирханов, М. Б. Ребезов // Торгово-экономические проблемы регионального бизнес-пространства: мат. междунар. научн.-практ. конф. (22–24 апреля 2013 года). — Челябинск: ИЦ ЮУрГУ, 2013. — с. 313–317.
9. Барышникова, Н. И. Значение лекарственных растений в производстве продуктов питания/Н. И. Барышникова // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. — 2012. — № 70 (т. 1). — с. 317.

Анализ работы механизма с накопителем энергии с силовым замыканием

Бехбудов Шавкат Хусенович, ассистент;
 Маджитов Зухриддин Завлиддинович, магистрант
 Бухарский инженерно-технологический институт (Узбекистан)

Во многих механизмах машин текстильной и легкой промышленности в качестве рабочего движения используется возвратно-поступательное или качательное движение. Если закон движения этих механизмов является гармоническим без выстоя или мало отличающийся от него, то имеется возможность значительного снижения инерционных нагрузок в кинематических парах механизма за счет использования упругих накопителей энергии.

При использовании упругих накопителей энергии возникает вопрос: каким образом выбирать параметры накопителя (упруга элемента), чтобы он наилучшим образом удовлетворял условиям эксплуатации механизма с силовыми замыканиями?

Для выяснения этого вопроса рассмотрим простейшую динамическую модель механизма с накопителем. При этом предполагаем, что ведомые и ведущие звенья абсолютно жесткие, масса (момент инерции массы) ведомой части механизма и жесткость накопителя являются сосредоточенными параметрами, не изменяющимся с течением времени.

Как показали практические расчеты, модель, указанная на рисунке 1 удовлетворительно описывает работу достаточно большого числа механизмов периодического движения, используемых в машинах текстильной и легкой промышленности.

Рассмотрим случай, когда имеет место силовое замыкание за счет использования энергии упругого элемента с линейной характеристикой. Соппротивление движению ведомой части механизма пропорционально скорости её перемещения с коэффициентом пропорциональности η .

Так как упругий элемент должен постоянно находиться в контакте с ведомой массой, то за начало отсчета выбираем крае положение ведущего звена 1

Для правильного функционирования механизма необходима обеспечить безотрывное движение ведомой, части механизма с массой m от ведущей. Выведем условия, которым должны удовлетворять параметры механизма и накопителя для безотрывной работы. Для этого запишем уравнение движения массы m с учетом силы тяжести.

Уравнение движения массы m имеет вид:

$$P_u + P_c + P_y \pm mg + R = 0 \tag{1}$$

где $P_u = -mx_1$; $P_c = -\eta x_1$; $P_y = -k(x_1 + x_0)$

R — реакция со стороны ведущей части механизма на ведомую.

Подставляя эти выражения в формулу (1), получим (здесь и далее считается, что сила тяжести прижимает ведомую часть механизма к ведущей):

$$R = mx_1 + \eta x_1 + k(x_1 + x_0) + mg \tag{2}$$

Движение без отрыва ведомой части механизма с массой m от ведущего звена 1 запишется в виде неравенства $R \geq 0$.

Для простоты рассмотрим случай, когда ведущее звено движется по гармоническому закону с частотой ω . Тогда (нижнее положение принято за начало отсчета):

$$X_1 = a(1 - \cos \omega t), \tag{3}$$

где a — амплитуда движения звена 1 (рис. 1).

Подставляя выражение X_1 в формулу (2), будем иметь:

$$R = k(x_0 + a) + mg + a(m\omega^2 - k)\cos \omega t + \eta\omega a \sin \omega t$$

$$R = kx_0 + mg + a\left(k + \sqrt{(k - m\omega^2)^2 + (\eta\omega)^2} \sin(\omega t - \varphi)\right)$$

или

В этом выражении R зависит от k и x_0 . Ясно, что конструктору желательно подобрать такие k и x_0 , которые на рабочей $\omega = \omega_1$ частоте механизма доставляли бы минимум наибольшему амплитудному (при $\sin(\omega_1 t - \varphi) = 1$) значению $R = R_1$. Следовательно, $R = R_1$ нужно рассматривать как функцию двух переменных, т. е. $R_1(k, x_0)$.

В то же время для нормальной работы механизма необходима чтобы наименьшее амплитудное (при $\sin(\omega_1 t - \varphi) = -1$) значение $R = R_2 \geq 0$. Далее будем рассматривать «критический случай», когда $R_1(k, x_0) = 0$. Таким образом, имеем функцию (без учета силы тяжести):

$$R_1(k, x_0) = kx_0 + a\left(k + \sqrt{(k - m\omega_1^2)^2 + (\eta\omega_1)^2}\right),$$

для которой хотим подобрать параметры k и x_0 , доставляющие ей минимум, и функцию (уравнение связи):

$$R_2(k, x_0) = kx_0 + \alpha \left(k - \sqrt{(k - m\omega_1^2)^2 + (\eta\omega_1)^2} \right) = 0$$

В математическом плане задача свелась к нахождению условного экстремума функции $R_1(k, x_0)$. Ее можно представить так: из всех точек линии $R_2(k, x_0) = 0$ нужно найти такую точку M , которая доставила бы минимум функции $R_1(k, x_0)$ (рис. 2). Из рисунка видно, что обычный экстремум (в данном случае-минимум) для функции $R_1(k, x_0)$ будет расположен на оси R в точке R_0 , а условных — в точке M_1 . Решение проведем методом множителей Лагранжа. Запишем функции в принятых в цитируемом источнике обозначениях:

$$f(k, x_0) = R_1(k, x_0), \varphi(k, x_0) = R_2(k, x_0) = 0$$

Для того, чтобы найти точки, которые могут быть точками условного экстремума функции $f(k, x_0)$, при уравнении связи $\varphi(k, x_0)$ нужно образовать вспомогательную функцию:

$$\Phi(k, x_0) = f(k, x_0) + \lambda \varphi(k, x_0)$$

где λ — некоторая постоянная (множитель Лагранжа), и составить уравнение для отыскания точек экстремумов этой функции с учетом уравнения связи. В результате получим три уравнения для определения трех неизвестных k , x_0 и λ :

$$\frac{\partial \Phi(k, x_0)}{\partial k} = 0; \frac{\partial \Phi(k, x_0)}{\partial x_0} = 0; \varphi(k, x_0) = 0$$

В развернутом виде эти уравнения запишутся так:

$$x_0 + a - \frac{a(k - m\omega_1^2)}{\sqrt{(k - m\omega_1^2)^2 + (\eta\omega_1)^2}} + \lambda \left[x_0 + a - \frac{a(k - m\omega_1^2)}{\sqrt{(k - m\omega_1^2)^2 + (\eta\omega_1)^2}} \right] = 0;$$

$$k + \lambda k = 0; kx_0 + a \sqrt{(k - m\omega_1^2)^2 + (\eta\omega_1)^2}$$

Из второго уравнения будем иметь ($k \neq 0$) $\lambda = -1$, а из первого (после подстановки значения λ) — $k = \omega_1^2$.

Имя значение k и подставляя его в последнее уравнение, получим:

$$x_0 = \alpha \left(\frac{\eta}{m\omega_1} - 1 \right)$$

По физическому смыслу предварительная деформация x_0 должна быть больше нуля. Если $\eta = m\omega_1$, то $x_0 = 0$ и предварительная деформация x_0 упругого элемента не нужно. Отбрасывая на основании этого в уравнении связи слагаемое, содержащее x_0 получим единственное выражение для подсчета k :

$$k = \sqrt{(k - m\omega_1^2)^2 + (\eta\omega_1)^2}$$

Отсюда будем иметь:

$$k = 0,5 \left(m\omega_1^2 + \frac{\eta^2}{m} \right)$$

Из проведенного решения следует, что предварительная деформация x_0 упругого элемента нужно только в случае достаточно большого сопротивления движению механизма, характеризуемого коэффициентом η . Например, если $\eta = m\omega_1$, то $k = m\omega_1^2$. Граничное значение $\eta = m\omega_1$ указывает на то, что, хотя при этом $x_0 = 0$, жесткость k упругого элемента должна подсчитываться по формуле $k = m\omega_1^2$.

Литература:

1. Лебедев, В. С. Технологические процессы машин и аппаратов в производствах бытового обслуживания. — М.: Легпромбытиздат, 1991. — 331 с.
2. Макаров, А. И., Крылов В. В. и др. Расчет и конструирование машин прядильного производства. — М.: Машиностроение, 1981. — 464 с.
3. Маракушев, Е. А. и др., Машины швейного производства. Конструкция, расчет и основы проектирования. — Киев, Техника, 1967. — 324 с.

Герметизация тальком как способ минимизации энергозатрат при изготовлении свечей зажигания

Домбровский Вадим Петрович, магистрант

Московский физико-технический институт (Высшая школа системного инжиниринга) (г. Долгопрудный)

В статье обобщены результаты обзора и сравнительного анализа способа герметизации тальком с традиционными способами герметизации металлокерамических соединений в свечах зажигания газотурбинных двигателей. Показано, что формирование герметичного уплотнения тальком не требует нагрева металлокерамического соединения, что позволяет не только предотвратить изменения механических свойств сталей и сплавов, применяемых в корпусных деталях свечей зажигания, но и как следствие исключить тепловые энергозатраты при их производстве. Полученные результаты в процессе аналитического обзора свидетельствуют о перспективности применения талька для герметизации вновь разрабатываемых свечей зажигания.

Ключевые слова: герметизация, тальк, энергозатраты, свечи зажигания.

Введение

В условиях современной глобализации процессов разработки и создания высокотехнологичных изделий, таких как газотурбинные двигатели, разработчик имеет возможность комплектовать свой двигатель узлами и системами любого поставщика, независимо от страны производителя, что обязывает комплектовщика к постоянному повышению конкурентоспособности своей продукции. При этом к основным критериям при выборе разработчиком той или иной системы относятся ее надежность, стоимость и расходы, связанные с ее эксплуатацией в составе изделия. В случае свечей зажигания требуемая надежность обеспечивается конструкцией и проведением периодических испытаний, подтверждающих стабильность технологического процесса изготовления свечей зажигания, эксплуатационные расходы ограничиваются ресурсом свечей, по истечении которого требуется их замена, стоимость свечей определяется ценой применяемых материалов, производительностью технологического оборудования, энергозатратами при изготовлении.

Учитывая, что фактический ресурс свечей зажигания ограничивается электроэрозивной стойкостью применяемых в их горячей части материалов, стоимость которых не зависит от разработчика, а самое современное высокопроизводительное технологическое оборудование доступно любому производителю, добиться конкурент-

ного преимущества возможно сокращением стоимости свечи, минимизируя энергозатраты, связанные с ее изготовлением.

Одним из самых энергозатратных процессов при изготовлении свечи зажигания является герметизация ее металлокерамических соединений, традиционно связанная с высокотемпературным нагревом узла герметизации.

В данной работе рассмотрены существующие технологические процессы герметизации свечей зажигания и проведен их сравнительный анализ с технологией герметизации тальком, с целью оценки возможности сокращения энергозатрат при изготовлении свечей зажигания.

Обзор способов герметизации свечей зажигания

Способ герметизации стеклогерметиком является традиционным среди мировых производителей свечей зажигания. Стеклогерметики являются неорганическими пластмассами, поскольку стекло представляет собой неорганический полимер, и при значительно более высокой температуре по сравнению с органическими пластмассами, характеризуются аналогичными свойствами, например пластической деформацией и т. п. Чаще всего используется низкоплавкое свинцовое стекло температура размягчения которого составляет (650—816) С. Стеклогерметик состоит из наполнителя и стеклосвязки, которые содержат окислы кремния, алюминия, свинца, титана,

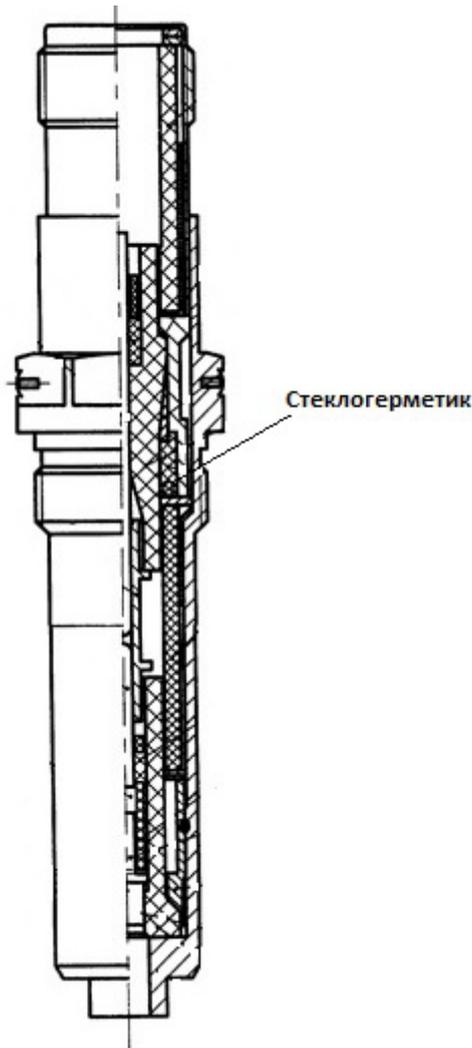


Рис. 1. Конструкция свечи зажигания с герметичным уплотнением стеклогерметиком

бора, кальция, бериллия. Способ герметизации заключается в уплотнении размягченного стеклогерметика в нагретом до температуры порядка 750 С узле герметизации, с его последующим остыванием на воздухе (рис. 1).

Герметизация опрессовкой методом термоосадки относится к классическому способу герметизации искровых свечей зажигания для поршневых двигателей. Однако такой способ нашел свое применение и при изготовлении свечей зажигания газотурбинных двигателей. Для обеспечения возможности такого способа герметизации снаружи на цилиндрическом корпусе свечи выполняется термоосадочная канавка (утонение корпуса). В процессе сборки керамический изолятор завальцовывают в металлическом корпусе свечи, затем одновременно нагревают корпус индуктором и осаживают на прессе, при этом термоосадочная канавка подвергается пластической деформации, а при остывании корпус термически осаживается и плотно охватывает изолятор (рис. 2). В результате термоосадки корпус оказывается в напряженном состоянии, что обеспечивает герметичность свечи на весь срок службы.

Герметизация с помощью металло-керамического паяного соединения (рис. 3) применяется в случае необходимости обеспечения вакуумной герметичности, когда утечка газа через свечу не допускается и может быть выявлена только специальным оборудованием, например гелиевым течеискателем. Учитывая, что керамика не обладает адгезией с металлическими припоями, предварительно на поверхность керамики вжигается молибден-марганец-кремниевое покрытие в восстановительной среде водорода. Такое покрытие обладает адгезией с металлизационным покрытием, например никелем, который в свою очередь обладает отличной адгезией практически со всеми металлическими припоями. Такой тип уплотнения обеспечивает вакуумную герметичность при давлении в зоне рабочего торца свечи до 1200 кгс/см². Однако паяные уплотнения имеют ряд ограничений, а именно:

— низкая прочность прецизионных сплавов (сплавов с заданным коэффициентом термического расширения, близким с коэффициентом расширения керамики), которые обеспечивают возможность герметичного металло-керамического паяного соединения;

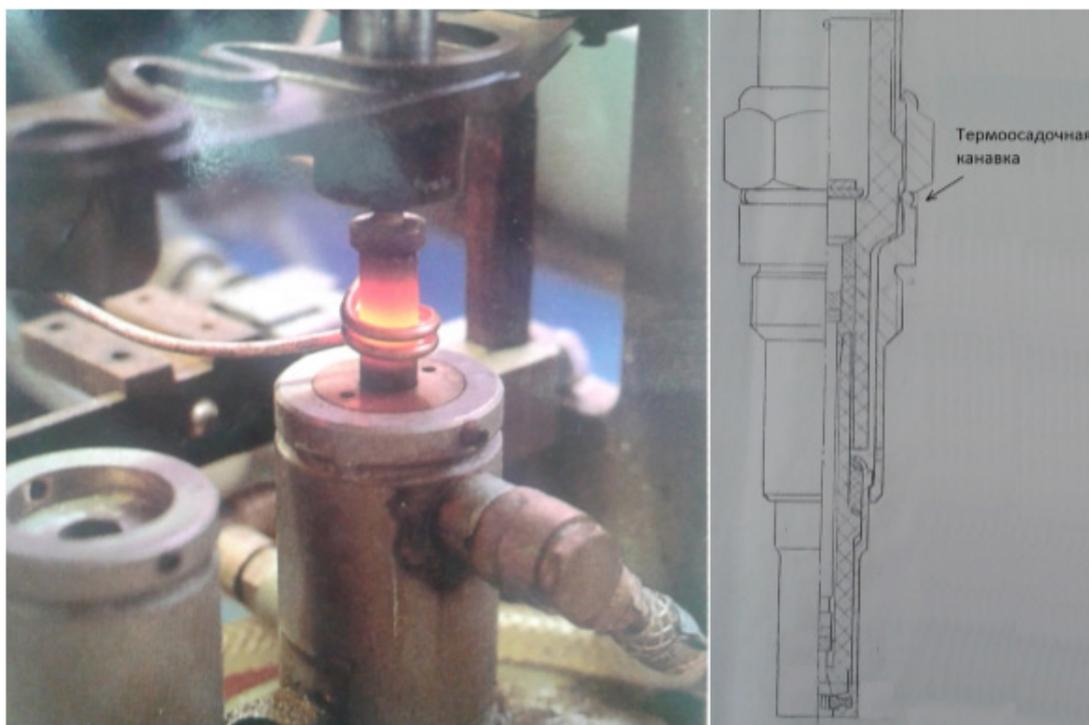


Рис. 2. Конструкция свечи зажигания с герметичным уплотнением термоосадкой (справа), нагрев узла герметизации индуктором (слева)

— ограничена эксплуатационная температура (не более 400 С), так как при большей температуре происходит разрыв металло-керамического соединения, из-за разности коэффициентов термического расширения материалов металлического корпуса и керамического изолятора.

Герметизация тальком при испытаниях опытных образцов обеспечила их надежную герметичность при давлении газа в зоне рабочего торца свечи до 50 кгс/см², после циклических термонагрузений узла герметизации температурой 600 С. Герметичность такого уплотнения обеспечивается опрессовкой талька между корпусом и изолятором. Однако, конструкция свечи зажигания с тальковым уплотнением имеет ряд ограничений, например, не допускается традиционная финальная промывка таких свечей в спирте (керосине) или в ультразвуковой ванне, так как спирт (керосин) может впитаться тальком, из-за чего может нарушиться равномерность уплотнения талька, и как следствие может нарушиться герметичность свечи. Преимущества такого способа уплотнения заключаются в том, что не требуется нагревать корпус при герметизации, имеется возможность повторной сборки узла, так как после его разборки все элементы узла герметизации сохраняют свою начальную конфигурацию.

Анализ обзора способов герметизации

В приведенном обзоре все способы обеспечения герметичного металлокерамического уплотнения, за исключением талькового, требуют высокотемпературного на-

грева узла герметизации свечи для обеспечения локальной (в месте термоосадочной канавки) пластичности металлического корпуса, или для придания текучести (размягчения) стеклогерметика для заполнения им всех зазоров и микротрещин в металлокерамическом соединении, или для расплавления припоя при пайке металлизированной керамики с металлическим корпусом свечи. Особенно энергозатратными являются уплотнения стеклогерметиком и пайкой, так как оба этих способа требуют больших предварительных тепловых энергозатрат, связанных с приготовлением стеклогерметика (переплав нескольких видов стеков с добавкой легирующих добавок), или высокотемпературным вжиганием специального молибден-марганец-кремниевое покрытия, обеспечивающего возможность металлизации керамического изолятора, например никелем.

Выводы

Таким образом, из аналитического обзора способов герметизации металлокерамических соединений в свечах зажигания, очевидно, что единственным способом герметизации, не требующим тепловой энергии, используемой для придания пластичности, текучести или расплавления одного из материалов в металлокерамическом соединении является способ герметизации тальком.

Проведенный анализ позволяет сделать вывод, что внедрение талькового уплотнения в конструкцию свечей зажигания существенно сокращает энергозатраты при их производстве и, как следствие, повышает их конкурентоспособность.

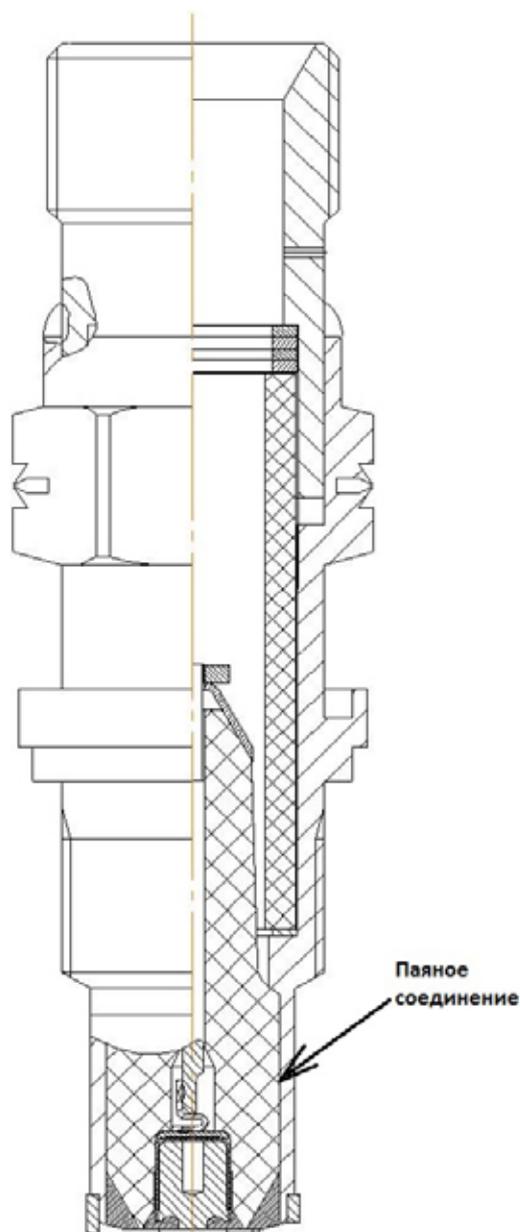


Рис. 3. Конструкция свечи зажигания с уплотнением пайкой

Литература:

1. Волк, М., Леффорд, Стетсон Р. Герметизация электротехнической и радиоэлектронной аппаратуры: Изд-во «Энергия», Москва 1966.
2. Световидов, А. П. Руководящий технический материал Пайка керамики с металлами РТМ-1164–67: НИИ Технологии и организации производства НИИТ, Москва 1967, УДК 666.3.037.5 (083.96).
3. Патент СССР № 549434, 30.03.77.
4. Патент РФ № 1720459, МПК (7) Н 01 Т 13/00, 30.03.1989.
5. Патент РФ № 51445, МПК (7) Н 01 Т 13/00, 22.05.2005.
6. Патент РФ № 54466, МПК (7) Н 01 Т 13/02, 27.06.2006.
7. Патент РФ № 1713399, МПК (7) Н 01 Т 13/00, 22.05.2005.

Выявление внутренних и наружных дефектов трубопроводов ультразвуковыми дефектоскопами

Жумаев Каюм Каримович, кандидат технических наук, доцент;
Каландаров Наврузбек Олимбаевич, магистрант
Бухарский инженерно-технологический институт (Узбекистан)

Компания T. D. Williamson накопила достаточно большой опыт выявления небольших и неглубоких (плоских) дефектов [4] с помощью внутритрубных ультразвуковых дефектоскопов с использованием пьезоэлектрических датчиков.

В течение долгого времени использовались ручные пьезоэлектрические датчики для дефектоскопии различных материалов и конструктивных элементов, в том числе трубопроводов. При внутритрубной дефектоскопии пьезоэлектрические устройства (датчики) монтируются на корпусе перемещающегося по трубопроводу дефектоскопа. Датчики являются составной частью электронной системы. Однако внутритрубная инспекция характеризуется значительно большей сложностью по сравнению с ручной, особенно при выявлении дефектов на небольших по площади участках трубопроводов или других структур. При применении, ручных дефектоскопов датчики дают возможность произвести многократное сканирование на сосредоточенном участке. Движущийся же по трубопроводу внутритрубный дефектоскоп проводит сканирование данного участка однократно. Кроме того, перемещение дефектоскопа означает, что датчики работают в нестабильных условиях, в том числе может изменяться угол их наклона по отношению к стенке трубопровода. Достаточно же надежные измерения толщины стенки трубопровода могут быть выполнены только в том случае, если оси датчиков сохраняют перпендикулярность к стенке (допустимое отклонение $2-3^\circ$). Необходимо также учитывать влияние шумов на уровень и характер сигналов в режиме приема.

Возможно выявление трех видов дефектов:

1. Толщина стенки трубы уменьшена в результате имеющегося наружного дефекта. Чаще всего такого рода дефекты образуются под действием гальванического эффекта, когда ионы металла переходят в электролит грунта. Такой вид коррозии обычно (но не всегда) характеризуется общими потерями металла и образованием коррозионных пятен с острыми краями. Разрастание пятен происходит в большей степени по площади и в меньшей — по глубине. Через некоторое время пятна сливаются вместе, образуя удлиненное вдоль оси трубопровода общее пятно. Эти коррозионные углубленные пятна хорошо отражают ультразвуковые импульсы, генерируемые пьезоэлектрическими датчиками. Уровень отраженного сигнала является достаточно приемлемым индикатором остающейся толщины стенки.

2. Возможен случай внутренней коррозии с повреждением стенки трубы изнутри. Процессы внутренней

коррозии характеризуются достаточной сложностью, гальванический механизм лишь изредка является причиной такой коррозии. Однако общий принцип применения ультразвуковых дефектоскопов одинаков для выявления как наружных, так и внутренних коррозионных повреждений регистрируется время поступления каждого отраженного сигнала, а время прохода ультразвукового сигнала в стенке делится пополам (так как сигнал проходит в стенке дважды). Зная скорость и время прохода ультразвукового сигнала в стали, можно определить остающуюся толщину стенки. При таком подходе, однако, нет возможности дифференцировать наружные повреждения от внутренних.

Очевидно, что если в процессе дефектоскопии поддерживать постоянным расстояние между датчиками и внутренней поверхностью стенки, то таким способом можно определить фактическую толщину стенки с достаточно высокой точностью. Поддержание такого постоянного расстояния, хотя и осуществимо технически, но все же связано с определенными трудностями, поэтому компания решила все же идти не по этому пути, а больше полагаться на выявление различий между информационными характеристиками наружных и внутренних коррозионных повреждений.

На некоторые виды коррозионных повреждений со стороны внутренней стенки трубопровода во многих случаях ультразвуковые дефектоскопы с пьезоэлектрическими датчиками не реагируют. Обычно площадь таких не фиксируемых дефектов меньше площади охвата ультразвукового пучка. Проблема возникает в случаях, когда глубина дефекта равна или меньше 25% от толщины стенки. По мере сканирования датчиком зоны дефекта часть ультразвуковой энергии отражается непосредственно от внутренней поверхности стенки трубопровода, а часть от дна дефекта. Если не вносить коррекцию в результаты обработки полученных данных, то результаты будут ошибочными, так как второе отражение происходит не от наружной поверхности стенки трубопровода, а от дна дефекта. Ошибка может быть фактически не замечена при интерпретации результатов дефектоскопии. Ошибка интерпретации усугубляется тем, что путь распространения ультразвуковых волн в прямом и обратном направлениях увеличивается на глубину дефекта, а скорость сигнала в перекачиваемой среде (нефти или нефтепродукте) в 4–5 раз меньше скорости распространения в стали.

3. Имеется еще один вид редко встречающихся внутренних коррозионных дефектов (хотя в последние 5–6 лет

они обнаружены на нескольких трубопроводах). Площадь коррозионных повреждений такого типа может колебаться в пределах 30–650 мм, а общая площадь корродированных зон может достигать нескольких десятков квадратных дециметров, они обычно располагаются в нижнем секторе трубы. Трудность выявления коррозионных повреждений такого типа заключается в том, что из-за большой протяженности нечетко отбиваются их границы — один датчик даст 2–3 последовательные отбивки или же два или более датчиков фиксируют один и тот же дефект. Точность детектирования таких коррозионных повреждений зависит от их геометрии и площади распространения. По мере возрастания площади коррозионных повреждений вероятность ошибки увеличивается.

Как показал опыт компании T. D. Williamson, эффективность выявления коррозионных повреждений описанных выше типов с помощью ультразвуковых дефектоскопов может быть повышена в результате дополнительной обработки результатов дефектоскопии. Процессор, обеспечивающий дополнительную обработку,

встроен непосредственно в схему ультразвукового дефектоскопа, перемещающегося внутри трубопровода. Процессор обрабатывает весь массив регистрируемых сигналов, производя выборку из него только информации, соответствующей действительным коррозионным повреждениям. Волновая последовательность состоит из 3-циклов импульса большой амплитуды, характеризующего отражение от внутренней поверхности стенки трубопровода, и нескольких меньших по амплитуде 2-цикловых импульсов, соответствующих отражениям от наружной поверхности стенки. Такая картина распределения импульсов на большинстве трубопроводов наблюдается в 95% случаев. Остающиеся 5% отраженных сигналов могут содержать данные, соответствующие отражениям сигналов от неровностей поверхности, от днщ неглубоких коррозионных повреждений и т.д. Разработанный компанией T. D. Williamson ультразвуковой дефектоскоп Flamsonic даст возможность обрабатывать множественные эхо-сигналы и соответствующим образом дифференцировать их, выявляя неглубокие дефекты.

Литература:

1. Капитальный ремонт магистральных трубопроводов./В. Л. Березин, Н. Х. Халлыев и др. — М., Недра, 1978.
2. Новые подходы к планированию ремонта и диагностике магистральных трубопроводов./Б. В. Будзуляк, Н. Х. Халлыев, В. Г. Селиверстов и др. — Обз. информ. — Сер. Транспорт и подземное хранение газа. — М.: ИРЦ Газпром, 1999.
3. Восстановление эксплуатационных параметров магистральных трубопроводов./Б. В. Будзуляк, Н. Х. Халлыев, В. Г. Селиверстов и др. — Обз. информ. — Сер. Транспорт и подземное хранение газа. — М.: ИРЦ Газпром, 1999.
4. Hamilton, J., Moon R. Understanding ultrasonic pipeline inspection: the experience of T. D. Williamson // Pipes and Pipelines Int. — 1995, VII–VIII. -P. 11–18.

Анализ способов восстановления посадочных отверстий корпусных деталей машин

Захаров Юрий Альбертович, кандидат технических наук, доцент;
Рылякин Евгений Геннадьевич, кандидат технических наук, доцент;
Лахно Александр Викторович, кандидат технических наук, доцент
Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

При эксплуатации, по вине агрегатов трансмиссии, происходит от 20 до 40% всех отказов. На долю корпусных деталей (КД) приходится около 16% отказов. Наибольшая повторяемость дефектов характерна для посадочных отверстий (ПО) под подшипники и стаканы. Выбор способа восстановления ПО КД зависит от многих факторов. Для реализации каждого способа восстановления ПО КД разработаны и внедрены разнообразные конструкции устройств и приспособлений, позволяющих наиболее полноценно реализовать тот или иной способ.

Ключевые слова: корпусная деталь, посадочное отверстие, восстановление, наплавка, осаждение, напыление, способ восстановления, полимерная композиция, гальванические покрытия.

В современных условиях производства эффективность ремонта техники тесно связана с разработкой, внедрением новых и совершенствованием существующих

способов восстановления деталей машин, позволяющих повысить производительность технологических процессов восстановления [1].

При эксплуатации, по вине агрегатов трансмиссии, происходит от 20 до 40 % всех отказов. Ресурс отремонтированных узлов и агрегатов в значительной мере зависит от уровня технологии и качества восстановления корпусных деталей. Например, ресурс коробок передач составляет 30–40 % от ресурса новых [1, 2, 3]. Больше всего изнашиваются корпусные детали (КД) и зубчатые колеса.

Во время эксплуатации рабочие поверхности деталей изнашиваются от воздействия ударных и знакопеременных нагрузок, сил трения, разрушающего воздействия окружающей среды, фреттинг — коррозии, а также подвергаются короблению от внутренних напряжений [1, 4]. На долю корпусных деталей приходится около 16 % отказов. Наибольшая повторяемость дефектов характерна для посадочных отверстий (ПО) под подшипники и стаканы. Коэффициенты повторяемости дефектов в виде износа поверхности отверстий под подшипники и стаканы для основных типов тракторов, автомобилей и комбайнов составляет 0,1–0,85. При этом коэффициенты восстановления корпусов в процессе капитального ремонта машин составляют 0,4–0,8 [1].

Ресурс коробок передач (КП), собранных из новых деталей и восстановленных корпусов с нарушениями пространственной геометрии составляет менее половины ресурса новых [1]. Поэтому в процессе восстановления наряду с доведением размеров отверстий до номинальных значений необходимо восстанавливать их пространственное расположение, выдерживая точные размеры.

Величина износа для тракторов Т — 150, МТЗ — 50, МТЗ — 80, ДТ — 75 составляет 0,065–0,33 мм. Износ ПО автомобильных КП меньше, чем тракторных, у автомобилей ЗИЛ — 130 он соответственно составляет 0,026–0,048; 0,15–0,25; 0,10–0,16 мм [1].

Корпусные детали трансмиссий изготавливают преимущественно из серого чугуна. После получения отливок «старение» деталей не производят, поэтому в них присутствуют большие внутренние напряжения. При последующей механической обработке происходит перераспределение напряжений, но, тем не менее, величина остаточных напряжений может быть существенной. Во время эксплуатации происходит снижение остаточных напряжений, что приводит к изменению пространственной геометрии корпусной детали и несоответствию её техническим требованиям.

В соответствии с техническими требованиями, отклонения не должны превышать: межосевых расстояний 0,07–0,105 мм, от соосности отверстий 0,03–0,05 мм, параллельности осей 0,05–0,17 мм на длине до 350 мм, от перпендикулярности отверстий к базовым плоскостям 0,05–0,08 мм на длине 100 мм [1].

Свыше 70 % корпусов КП автомобиля ЗИЛ — 130 имеют перекося и непараллельность осей отверстий, выходящие за допустимые пределы. По причине несоосности требуют восстановления 86 % корпусов трансмиссий, 34 % корпусов КП трактора МТЗ — 50 и 88 % корпусов

КП комбайна СК — 5, в то время как по предельным износам посадочных отверстий соответственно 22 и 60 % [1].

Приведенные выше данные показывают необходимость восстановления посадочных отверстий и их расположения в корпусах, поскольку износ, координация и взаимное расположение отверстий корпусных деталей оказывают большое влияние на долговечность отремонтированного агрегата. Послеремонтный ресурс агрегатов трансмиссии, имевших все детали новые, за исключением корпусных, составляет всего лишь 30–40 % от доремонтного ресурса [1–5].

В настоящее время существует достаточно большое количество способов восстановления изношенных ПО КД, основными из которых являются: механические; сварочно-наплавочные; напыление; тепловая деформация; нанесение полимерно-композитных материалов; нанесение гальванопокрытий.

Большое распространение в практике ремонтного производства получил механический способ установки дополнительных деталей — толстостенных и тонкостенных колец. Толстостенные кольца запрессовывают в предварительно расточенные отверстия и растачивают под номинальный размер. Иногда, кольца стопорят винтами, развальцовкой или клеем. Способ достаточно прост, однако предварительная расточка снижает механическую прочность корпусной детали, что приводит к возникновению трещин во время эксплуатации, а иногда и во время запрессовки кольца. Кроме того, он трудоемкий и не универсальный, так как из конструктивных особенностей некоторых деталей он вообще не применим, требует значительного расхода металла.

Вклеивание колец из стальной ленты толщиной 1,0–1,2 мм незначительно снижает прочность детали. Способ также прост, но трудоемок и дорог. И не обеспечивает высокой прочности соединения «кольцо — деталь».

Существует способ восстановления ПО КД установкой стальных свертных втулок на клею с последующим растачиванием. Для КД, работающих при температуре свыше 353 К, рекомендуется применять теплостойкий клей типа ВС — 10Т. Отверждение клея происходит при температуре 448–458 К в течение 1 ч, что создает определенные неудобства.

Восстанавливать ПО КД можно постановкой ленточных элементов с натягом с помощью клина из ленты, с отбортовкой его боковых сторон или его приклеиванием с последующей механической обработкой. Данный способ обеспечивает технические требования на точность размеров, точность расположения ПО, но достаточно трудоемок.

Способы восстановления ПО КД с применением накатки и электромеханического выдавливания несмотря на очевидную простоту, не находят применения по причине уменьшения площади рабочей поверхности ПО, нарушения структуры и недостаточной долговечности посадки. Повторное восстановление этими способами невозможно [1].

Процессы напыления и пропано-порошковой наплавки обеспечивают высокую производительность, но вместе с этим сопровождаются большим расходом материалов, напыленный слой имеет много пор, плохую сцепляемость с основой [1, 2, 3]. Наплавки другого рода позволяют наносить на изношенные поверхности слой практически любой толщины и химического состава с заданной твердостью и износостойкостью. Однако они сопровождаются высокими температурами, которые приводят к нарушению структуры металла, вызывая его «отбеливание», что создает большие трудности при последующей механической обработке. Наплавленные слои содержат большое количество пор, раковин и трещин. Значительные внутренние напряжения приводят к образованию трещин в перемычках и короблению. Геометрические параметры деталей выходят за пределы, допускаемые техническими условиями, а в отдельных случаях могут приобрести отклонения даже больше, чем имели до восстановления.

Известен метод контактной приварки стальной ленты или порошка на изношенные поверхности ПО КД. Достоинством разработки является исключение значительного нагрева КД. Однако из-за сложности применяемого оборудования и трудности последующей механической обработки применение его ограничено.

Существует тепловой способ восстановления ПО КД [1]. Он основан на свойстве чугуна увеличиваться в объеме при нагревании до определенной температуры. Способ достаточно прост и универсален, но максимально уменьшить диаметр отверстия этим способом можно только на 0,15 мм, при этом ухудшаются механические свойства металла, образуются перенапряжения в сложных сечениях, что приводит к возникновению трещин и короблению.

В последнее время в ремонтном производстве находят применение полимерные покрытия с различными наполнителями и свойствами [1–5]. Для восстановления ПО КД рекомендуют наносить композиции на основе эпоксидной смолы, с отверждением их при нагреве по ступенчатому циклу или в магнитном поле, эластомеры ГЭН — 150 (В), ПС — 40, герметик — 6Ф. Указанные методы просты и экономичны, частично или полностью предотвращают фреттинг-коррозию. Однако выкрашивание покрытий при механической обработке, многослойность, невысокая твердость, низкая теплопроводность, изменение физико-механических свойств покрытий

во времени, необходимость проведения термической обработки, невозможность нанесения покрытий толщиной более 0,2 мм из эпоксидной смолы и 0,1 мм из эластомеров ГЭН — 150 (В) и герметика 6Ф ограничивают применение полимерных материалов.

Одним из перспективных способов восстановления ПО КД является нанесение гальванических покрытий [1, 2, 3, 6, 7]. Преимущества гальванопокрытий заключаются в возможности получать путем электроосаждения осадки любой толщины в пределах от нескольких микрометров до 1–2 мм. После нанесения покрытия прочность детали снижается незначительно, структура основного металла не претерпевает изменения, коробление отсутствует, а сами покрытия обладают достаточно высокими физико-механическими и эксплуатационными свойствами.

Основными способами нанесения гальванических покрытий на поверхности посадочных отверстий корпусных деталей являются осаждение в стационарных ваннах; электролитическое натирание (контактный); осаждение с использованием местных ванн в нециркулирующем электролите; осаждение в проточном электролите.

Выбор способа восстановления ПО КД зависит от многих факторов, таких как номенклатура восстанавливаемых деталей, их типоразмер, габаритные размеры и масса, материал корпусной детали и вставок посадочных отверстий, характер нагружения и режимы работы деталей, требования по точности и износостойкости восстановленных ПО КД, температурные ограничения, обеспечение возможности многократного восстановления и так далее.

Основные пути совершенствования способов восстановления ПО КД направлены на повышение производительности, надежности и качества восстановления, снижения трудоемкости работ и всякого рода затрат, расширение номенклатуры деталей, которые возможно восстанавливать тем или иным способом и снижение, вплоть до устранения, брака при восстановлении ПО КД.

Для реализации каждого способа восстановления ПО КД разработаны и внедрены разнообразные конструкции устройств и приспособлений, позволяющих наиболее полноценно реализовать тот или иной способ [8–15]. Эти устройства постоянно совершенствуются и модернизируются, с целью обеспечения наилучших условий и точного выполнения возложенных на них функций.

Литература:

1. Захаров, Ю. А. Совершенствование технологии восстановления посадочных отверстий корпусных деталей проточным электролитическим цинкованием: Дис. ... канд. техн. наук [Текст]/Ю. А. Захаров. — Пенза, 2001. — 170 с.
2. Голубев, И. Г. Мониторинг технологических процессов восстановления деталей [Текст]/И. Г. Голубев, В. В. Быков, А. Н. Батищев, В. В. Серебровский, И. А. Спицын, Ю. А. Захаров // Технический сервис в лесном комплексе/Сб. материалов. науч.-практ. конф. — Москва: МГУЛ, 2000. — с. 31.
3. Зубарев, П. А. Производственный процесс получения защитных полиуретановых покрытий [Текст]/П. А. Зубарев, А. В. Лахно, Е. Г. Рылякин // Молодой ученый. — 2014. — № 5. — с. 57–59.

4. Лахно, А. В. Восстановление деталей машин из полимерных материалов [Текст]/А. В. Лахно, Е. Г. Рылякин // Молодой ученый. — 2014. — №8. — с. 196–199.
5. Спицын, И. А. Восстановление посадочных отверстий корпусных деталей проточным цинкованием [Текст]/И. А. Спицын, Ю. А. Захаров // Материалы научной конференции профессорско-преподавательского состава и специалистов сельского хозяйства. — Пенза: ПГСХА, 1999. — с. 33–35.
6. Голубев, И. Г. Анализ технологических процессов восстановления деталей гальваническими покрытиями [Текст]/И. Г. Голубев, В. В. Быков, А. Н. Батищев, В. В. Серебровский, И. А. Спицын, Ю. А. Захаров // Состояние и перспектива восстановления, упрочнения и изготовления деталей/Сб. материалов. науч.-практ. конф. — Москва: МГУЛ, 1999 — с. 127–128.
7. Спицын, И. А. Совершенствование технологии восстановления посадочных отверстий корпусных деталей цинкованием [Текст]/И. А. Спицын, Ю. А. Захаров // Технический сервис в лесном комплексе/Сб. материалов. науч.-практ. конф. — Москва: МГУЛ, 2000. — с. 75.
8. Спицын, И. А. Устройство для электролитического нанесения покрытий проточно-контактным способом с активацией восстанавливаемой поверхности [Текст]/И. А. Спицын, Ю. А. Захаров // Совершенствование технологии и технических средств механизации сельского хозяйства/Сб. материалов. науч.-практ. конф. — Пенза: ПГСХА, 2001. — с. 58.
9. Спицын, И. А. Устройство для нанесения электрохимических покрытий и его исследование [Текст]/И. А. Спицын, Ю. А. Захаров, И. А. Гвоздев // Материалы 45-ой научно-технической конференции студентов инженерного факультета. — Пенза, 2001. — с. 16–17.
10. Спицын, И. А. Электролитическое нанесение покрытий проточно-контактным способом [Текст]/И. А. Спицын, Ю. А. Захаров // Механизация и электрификация сельского хозяйства. — 2002 — №5. — с. 30–31.
11. Захаров, Ю. А. Устройство для гальваномеханического восстановления валов [Текст]/Ю. А. Захаров, А. И. Воронцов // Материалы 48-ой научно-технической конференции молодых ученых и студентов инженерного факультета. — Пенза, 2003. — с. 43.
12. Захаров, Ю. А. Устройство для нанесения электрохимических покрытий на шейки коленчатого вала [Текст]/Ю. А. Захаров, Д. А. Лебедев // Современные аспекты развития АПК: сборник материалов 51-ой научной конференции студентов инженерного факультета пензенской государственной сельскохозяйственной академии. — Пенза: РИО ПГСХА, 2006. — с. 74–77.
13. Захаров, Ю. А. Совершенствование устройств для нанесения гальванопокрытий [Текст]/Ю. А. Захаров // Образование, наука, медицина: эколого-экономический аспект: сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции, посвященной памяти профессора А. Ф. Блинохватова. — Пенза: РИО ПГСХА, 2008. — с. 172–173
14. Пат. 2155827 РФ, МПК: 7С 25D 5/06А. Устройство для электролитического нанесения покрытий/И. А. Спицын, Ю. А. Захаров (РФ). — №99115796/02, Заявлено 16.07.1999; Оpubл. 10.09.2000.
15. Пат. на полезную модель 2503753 РФ, МПК: С25D19/00. Устройство для гальваномеханического осаждения покрытий/Ю. А. Захаров, И. А. Спицын (РФ). — №2012149639/02, Заявлено 21.11.2012; Оpubл. 10.01.2014, Бюл. № 1.

Математическая модель классификации состава выпускаемых изделий с использованием экспертных методов

Зольников Владимир Константинович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой;

Абдуллаев Улмас Алишерович, аспирант

Воронежская лесотехническая академия

В сегодняшнее время существуют разные математические методы [6] для решения задачи управления торговли, подбора товаров на разных уровнях предприятий.

Из проведенного анализа зарубежных и отечественных разработок в области математического моделирования вытекает: разработка математических методов в определении качества выпускаемых изделий должна формироваться по этапной схеме. Автоматизация формирования множества признаков товаров однородных по смыслу их качеств, разработка критериев, формирование резерва выпуска изделий из сформированных множества товаров. Ниже сформулирован первый этап разработки математических методов в определении качества выпускаемых изделий.

Уровень развития производства (предприятий, объединений, ведомость) зависит от качественного состава выпускаемых изделий. Качественный состав выпускаемых изделий — это такой аспект развития производства, который в числе других факторов обеспечивает выполнение спроса потребителей. Этот аспект описывается различными признаками, которые относятся к отдельному виду товаров, имеющихся в производстве. На основе этого набора признаков сформулируем задачу классификации выпускаемых изделий следующим образом. На каждом месте работы или в быту потребители сталкиваются с выбором качественных предметов из совокупности однородных предметов. Например, при покупке машины, одежды или фруктов мы можем просмотреть вначале целый ряд примерно однородных предметов, прежде чем остановим свой выбор одним из них. Или возьмем другой пример, относящийся к производству: при выпуска изделий его качества рассматривается специальными комиссиями, которые оценивают производственные достижения и качество работы отдельных работников и целых коллективов, затем ранжируются по степеням, качеству работы однородных предприятий и работников. Отсюда видно, что каждый член комиссии выставляет определенную оценку, основываясь на объективных признаках, а также своим профессиональным опытом и интуиции.

Отсюда вытекает вопрос: нельзя ли, анализируя трудовую и качественную деятельность каждого производства товаров, автоматизировать вышеизложенные процессы, используя современные новые информационные технологии? Если этот вопрос реализуется, то не будет нужды создавать комиссии для обработки информации выпускаемых изделий ручным способом, так как у нас будет формализованный способ решения задачи классификации параметров, которые позволяет качества выпускаемых изделий предприятия.

Классификация выпускаемых изделий, на основе удовлетворенности спроса потребителей, т.е. учитывая совокупность качеств в условиях функционирования новые информационные технологии предприятий торговли — более сложная проблема. Однако успешное функционирование производства во многом зависит от качественного уровня товаров. Главным критерием распределения выпускаемых товаров по спросам потребителей должна быть только труд — его количество и качество. Однако, в практических условиях не всегда бывает так. Возникает различного рода уравниловка, факты начисления зарплаты по существу лишь за явку на работу, а не за ее реальные результаты, выдача незаслуженных премий и т.д. Устранение таких вредных явлений в обществе во многом зависит от формирования социальных качеств работников производство и управляющего персонала предприятий. По этому поводу надо отметить следующие факторы: для производства качественных изделий необходимо всегда и повсеместно обеспечивать справедливую и объективную оценку трудового вклада каждого работающего. Надо всемерно поощрять добросовестных работников [1,2], не оставлять лодырям и бракоделам никаких лазеек для хорошей жизни при никудышной работе.

Исходя из этого, в настоящее время производства ощущает подобрать в таких математических моделях и технологии, которые обладают высокими уровнями качеств выпускаемых изделий.

Постановка задачи классификации качеств выпускаемых изделий на основе их степени спроса и других качественных и количественных признаков осуществляется впервые. Реализацию этой задачи можно использовать как методику руководителями при системе управления и поддержки принятия решений для самоорганизации социально-экономических систем предприятия торговли. Теперь сформулируем постановку задачи на языке математического аппарата.

Пусть L — статистическое пространство. Элементами $F_{kp} \in L$ является множество сырья подлежащих в производстве. Предположим, что каждый товаров характеризуется набором количественных и качественных признаков $F_{kp} = (f_{1p}, f_{2p}, \dots, f_{np})$, которые описывают k -го товара как n -мерные точки в $F_{kp} \in L$, где $p = 1, 2, \dots$.

Задача классификации товаров по их качествам производится разбиением L на классы [3], так что $L = \bigcup_{\varepsilon} L_{\varepsilon}$, $L_i \cap L_j = \emptyset$ или $L_i = L_j$ и отнести F_{kp} -го товара к одному из классов L_{ε} . Пространство L является

однородным, если выполняется условие [4,5], $\rho(L'_i, L'_j) = |L'_i - L'_j| < \varepsilon$ где $\varepsilon (> 0)$ — заданное число;

L'_i, L'_j — выборочные среднее значение соответственно, класса $L_i, L_j (< L)$ и вычисляется: $L'_i = \frac{1}{P_i} \sum_{k \in L_i} F_{km}$,

$L'_j = \frac{1}{P_j} \sum_{k \in L_j} F_{km}$. Класс L_i является однородным, если выполняется условие: $\rho(F'_{ki}, F'_{kj}) < \varepsilon$ (1) где

$F'_{ki}, F'_{kj} (\in L_i)$ — выборочное среднее значение k и k' товара вычисляется соответственно:

$$F'_{ki} = \sum_{k \in L_i} \frac{f_{km}}{P_i}, F'_{k'i} = \sum_{k \in L_i} \frac{f_{km}}{P_j}$$

Теорема. Рассмотрим случайную величину, $F' = F_{ki} - F_{kj}$, т. е. разность средних двух выборок F имеет выборочное распределение со средним $\mu_{F'} = \mu_{F_{ki}} - \mu_{F_{kj}}$ и дисперсией $\sigma_{F'}^2 = \frac{\sigma_{F_{ki}}^2}{P_i} + \frac{\sigma_{F_{kj}}^2}{P_j}$ (2). Если $F_{ki}, F_{kj} \in L_i$,

то обозначая $F_{ki} = F_{kj} = F_{km}$ и по (2) получаем: $\sigma_{F'}^2 = (p_i + p_j)\sigma_{F_{km}}^2 / p_i p_j$
 (3) $\mu_{F'} = \mu_{F_{ki}} - \mu_{F_{kj}} = \sum_{k \in L_i} \frac{f_{km}}{p_i} - \sum_{k \in L_j} \frac{f_{km}}{p_j}$ (4). Тогда выборочные оценки дисперсий в классе L_i равны:

$$\sigma_{F_{km}}^2 = \left(\sum_{k=1}^{p_i+p_j} f_{km}^2 - (p_i + p_j) \overline{f_{km}}^2 \right) / (p_i + p_j - 1) \quad (5).$$

Используя, (3) и (5) получим меру рассеяния элементов в пространстве L :
 $\sigma_{F'}^2 = \frac{p_i + p_j}{p_i p_j (p_i + p_j - 1)} \left(\sum_{k=1}^{p_i+p_j} f_{km}^2 - (p_i + p_j) \overline{f_{km}}^2 \right)$ (6). Используя метод максимального правдоподобия, определим плотность вероятности нормального распределения качества признаков товара в классе L_i и L_j :

$$\Phi(L_i, L_j) = (2\pi)^{-\frac{n}{2}} \left| \sum \left| -\frac{1}{2} * e^{-\frac{1}{2} \sum_{m=1}^n [\hat{F} - \rho(\hat{F}_{ki}, \hat{F}_{kj})]^2} / \sigma_{F'}^2 \right. \right| \quad (7). \text{ Из (7): } \sum = \begin{vmatrix} \sigma_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{22} & 0 & 0 \\ \cdot & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_{mm} \end{vmatrix} \text{ учитывая, (1) полу-}$$

чим $\Phi(L_i, L_j) = (2\pi)^{-\frac{n}{2}} \left| \sum \left| -\frac{1}{2} e^{-\frac{1}{2} \sum_{m=1}^n \frac{\hat{F}^2}{\sigma_{F'}^2}} \right. \right| \quad (8). \text{ Из (8) вычислим}$

$Ln\Phi(L_i, L_j) = -\frac{n}{2} \ln 2\pi - \frac{1}{2} \ln \left| \sum \left| -\frac{1}{2} \sum_{m=1}^n \frac{\hat{F}^2}{\sigma_{F'}^2} \right. \right|$ отсюда следует:

$Ln\Phi(L_i, L_j) = -\frac{n}{2} \ln 2\pi + \frac{1}{2} \ln |\varphi^*| - \frac{1}{2} \sum_{m=1}^n \frac{\hat{F}^2}{\sigma_{F'}^2}$ (9) где $\varphi^* = \sum^{-1}$. Из (9) видно, что если

$|\varphi^*| \rightarrow \infty, \sum_{m=1}^n \frac{\hat{F}^2}{\sigma_{F'}^2} \rightarrow 0$, то $Ln\Phi(L_i, L_j) \rightarrow \infty$. Функция (7) имеет максимальное значение, если выражение

$$\sum_{m=1}^n \frac{\hat{F}^2}{\sigma_{F'}^2} \rightarrow \min \quad (10).$$

Выражение из (10) заменим их значениями, приведенными в (4) и (6):

$$\Phi(L_i, L_j) = \sum_{m=1}^n \frac{\hat{F}^2}{\sigma_{F'}^2} = \sum_{m=1}^n \frac{\left(\frac{1}{p_i} \sum_{k \in L_i} f_{km} - \frac{1}{p_j} \sum_{k \in L_j} f_{km} \right)^2}{\frac{p_i + p_j}{p_i p_j (p_i + p_j - 1)} \left(\sum_{k=1}^{p_i+p_j} f_{km}^2 - (p_i + p_j) \overline{f_{km}}^2 \right)}$$

$$= \frac{p_i + p_j - 1}{p_i p_j (p_i + p_j)} \sum_{m=1}^n \frac{\left(p_j \sum_{k \in L_i} f_{km} - p_i \sum_{k \in L_j} f_{km} \right)^2}{\sum_{k=1}^{p_i+p_j} f_{km}^2 - \frac{1}{p_i + p_j} \left(\sum_{k=1}^{p_i+p_j} f_{km} \right)^2} \quad (11)$$

где $\overline{f_{km}} = \frac{1}{p_i + p_j} \sum_{k=1}^{p_i+p_j} f_{km}$ должна достигаться в минимальном значении при $\forall i, j$. Однородность класса $L_i \subset L$ достигается при $\min_{\min i, j} \{ \Phi(L_i, L_j) \} \leq \gamma^2_{\alpha, m}$ (12) где $\gamma^2_{\alpha, m}$ – пороговое значение, по уровню значимости α и m степенями свободы.

Литература:

1. Анициферова, В. И., Зольников В. К. Анализ подготовки специалистов по радиоэлектронике для научно-производственных и коммерческих структур в современных условиях. Моделирование систем и процессов. 2009. №3–4. с. 5–12.
2. Беляева Т., П., Зольников В. К., Чубур К. А. Экспертно-мониторинговый анализ на этапе выработки и поддержки принятия управленческих решений. Моделирование систем и процессов. 2012. №1. с. 22–27.
3. Бибииков, Ю. Н. Курс обыкновенных дифференциальных уравнений: учеб. для вузов. — М.: Лань, 2011. — 304 с.
4. Гладков, Л. А., Курейчик В. В., Курейчик В. М. Генетические алгоритмы: учеб. для вузов. — М.: Физматлит, 2010. — 368 с.
5. Зольников, В. К., Манучарян Л. А. Валидация извлеченной информации на основе онтологического описания. Моделирование систем и процессов. 2012. №3. с. 28–30.
6. Abdullaev, U. A. Modeling of the development of trade-based enterprise application software package Maple. // 1st International Scientific Conference, European Applied Sciences: modern approaches in scientific researches, Stuttgart, Germany December 17–19, 2012. P. 139–142.

Передовые технологические процессы извлечения лома из железобетонных сооружений в отдаленных районах

Кириченко Андрей Сергеевич, научный сотрудник;
Букин Антон Валерьевич, инженер-исследователь
ЦНИИ черной металлургии имени И. П. Бардина (г. Москва)

Рассмотрены технологии и оборудование для утилизации и переработки железобетонных конструкций с извлечением лома черных металлов и получением товарной бетонной фракции. Отмечены технологические процессы, ориентированные на работу в отдаленных районах. Даны конструктивные особенности и преимущества данного специализированного оборудования, факторы, определяющие экономическую эффективность его использования.

Ключевые слова: утилизация железобетона, переработка лома, технологическое оборудование, экономические преимущества.

В России в 1995–2007 годах происходил массовый вывод из эксплуатации низко эффективных мощностей предприятий и техники, еще советской постройки, что позволило России войти в число ведущих мировых экспортеров лома.

Так в 2005 году Россия заняла 1ое место в мире по экспорту лома черных металлов — 12,6 млн т, из которого 10,8 млн т. было отгружено морем [1]. В преддверии дефолта 2008 года российский экспорт лома несколько снизился и составил 7,91 млн т (2009 г.), из которых 4,82 млн т — морской экспорт [2]. На фоне стремительного роста мирового производства стали и высоко спроса на стальной лом и высоких цен Россия вновь вернулась в тройку ведущих мировых экспортеров лома.

Глобальный экономический кризис привел к сокращению потребности в ломе и падению цен на мировых и региональных рынках, что сделало ломозаготовку в отдаленных районах страны экономически не выгодной. В кризисный для отрасли 2009 год экспорт лома снизился до 3,7 млн тонн (морем 2,67 млн т) [3]. Кроме того, в последние

годы на лом сдаются в основном металлоконструкции, машины и оборудование уже производства России, первых лет работы в условиях рынка, когда видимое потребление стали в стране существенно сократилось [4]. Эта тенденция проявляется и других республиках СНГ.

Сбор лома в целом в странах СНГ в 2013 году упал на 7%, а его экспорт за пределы СНГ снизился на 8%. до 4,9–5 млн тонн. Существенное уменьшение сбора и потребления лома за 2012–2013 гг. отмечено на Украине — на 27 и 24% соответственно. В России по итогам 2013 г показатели сбора лома снизились на 11–12%, потребление на 4% (к 2012 г.).

В тоже время по прогнозу производство стали в России к 2020 г. вырастет на 13% (в том числе на 25% — конвертерной и на 47% — электростали) [4]. Потребность в ломе при таком прогнозе по экспертным оценкам вырастет до 28 млн т, или на 35%, по сравнению с относительно благополучным докризисным 2007 годом, что приведет к определенному дефициту лома и необходимости задействовать дополнительные вторичные ресурсы [5,6].

В кризисных условиях мировой и отечественной экономики экспорт лома для многих предприятий отрасли заготовки и переработки вторичных металлов является основным источником пополнения валютных средств и инвестирования в новое оборудование. По данным ГТК РФ экспорт лома и отходов черных металлов России сократился в 2013 году до 3,75 млн тонн (против 4,3 млн т в 2012 году) [7, 8].

За последние годы в структуре ломообразования произошли некоторые изменения — снизилась доля оборотного лома (около 20% в объемах образования и потребления лома) из-за совершенствования процессов непрерывной разливки стали [9, 10]. Проявляется тенденция роста образования нового лома, около 15% всего ломообразования, преимущественно за счет транспортного и строительного лома [11, 12, 13].

За последние десять лет доля машиностроения как генератора лома сократилась с 48% до 35%, доля строительства выросла с 28 до 38%. Строительный лом и лом транспортных средств — две позиции в структуре ломообразования, по которым имеет место неуклонного роста абсолютных объемов и доли в общем объеме ломозаготовки в стране.

Генеральным направлением в увеличении ломосбора и роста степени рециклинга черных и цветных металлов является использование новых технологий и высокопроизводительного оборудования [14, 15]. А также внедрение передового зарубежного опыта [16].

Ранее стальной лом из ЖБИ в нашей стране не привлекался. Однако в последние годы, в связи с массовым сносом блочных домов первых массовых серий в крупных городах России начала внедряться технология переработки ЖБИ, по которой производится разборка зданий, сооружений; вывоз образовавшихся строительных отходов и строительного мусора на переработку, с целью выделения бетонной фракции, пригодной для использования в дорожном строительстве, стального лома и остатка строительного мусора, подлежащего захоро-

нению. Для этого применяются стационарные комплексы, обеспечивающие дробление ЖБИ до фракций требуемых размеров и выделение железных включений [17]. Такие комплексы экономически оправданы при гарантированном и стабильном объеме переработки исходного сырья и при небольших расстояниях перевозок.

В тоже время в стране происходит накопление отслуживших свой срок сооружений и зданий из железобетона, которые территориально отдалены от крупных городов, где организована переработка ЖБИ. В последние годы в передовых зарубежных странах был разработан комплекс оборудования для рециклинга ЖБИ в отдаленных районах и возвращения образующихся материалов во вторичный оборот. Этот комплекс состоит из экскаватора и комплекта навесного оборудования, в который входят:

Механические ножницы по бетону и арматуре являются основным инструментом для демонтажа железобетонных конструкций. Производительность — до 12–16 циклов в минуту. Резка выполняется в пределах вылета стрелы экскаватора (с гидравлическим приводом). В центре ножниц встроены стальные лезвия, что позволяет резать трубы и арматуру (Рис. 1).

Механические ножницы для резки стали и для ломозаготовки предназначены для обработки лома стальных сварных балок, швеллеров, уголков, они производят до 12–14 циклов в минуту (Рис. 2). Лезвия легко заменяются и переустанавливаются благодаря специальной системе быстрого съема. Смонтированные на конце стрелы ножницы выполняют резку в любой позиции в пределах вылета стрелы. Наиболее эффективны при ломозаготовке и утилизации стальных ферм, мостов, мачт, павильонов. Применяются как для стальных, так и алюминиевых конструкций.

Широкозахватные ножницы для резки арматуры на прутки — обеспечивают дробление арматуры на куски (длиной обычно от 60–150 мм) с целью увеличения удельной плотности лома до значений, соответствующих маркам товарного лома [18]. Они имеют механический



Рис. 1. Универсальные ножницы



Рис. 2. Ножницы для металла



Рис. 3. Измельчитель арматуры



Рис. 4. Измельчитель бетона

привод. Ширина захвата (типовых конструкций) 570–610 мм (Рис. 3).

Измельчитель бетона — навесное оборудование на стрелу, дробит бетонные балки, плиты, перекрытия на щебень фракции 6–12 см, используемый в дорожном строительстве (Рис. 4.). Для демонтажа особо прочных монолитных железобетонных конструкций в состав оборудования включают и навесной гидравлический молот (Рис. 5).

Гидравлический полноповоротный грейфер для лома предназначен для погрузки (Рис. 6).

Экскаватор с комплектом сменного оборудования всегда готов к изменению характера работ — от сноса бетонных зданий и сооружений, до разделки на лом стальных конструкций, судов и прочее. При сезонных спадах в объемах работ, неблагоприятной конъюнктуре цен на лом, экскаватор можно перевести и на земельные работы ковшом. Ковш также используется при отгрузке строительного мусора. Это обеспечивает высокую

загрузку техники в течение и ее окупаемость, снижает инвестиционные риски.

Данная технология требует минимума техники. Современные конструкции экскаватора и сменного оборудования позволяют осуществлять замену навесного оборудования одним экскаваторщиком без тяжелого ручного труда. Часть оборудования экскаваторщик заменяет не выходя из кабины. Смена более сложного оборудования требует операций по отключению/подключению системы гидравлики. Для вывоза фракций измельченного бетона и мусора целесообразно использовать большегрузные самосвалы, а при местных перевозках по бездорожью — составами из трактора и прицепа-самосвала [19].

По этой технологии отделение арматуры, стальных балок и др. металла выполняет стрелой экскаваторщик при работе универсальными ножницами. Некоторые остатки не извлеченного металла дробятся и попадают в товарную смесь для дорожного покрытия. Они не оказывают отрицательного воздействия и даже улучшают проч-



Рис. 5. Гидравлический молот



Рис. 6. Грейфер для лома



Рис. 7. Полноповоротные универсальные ножницы

ностные характеристики покрытия, и тем самым также вовлекаются во вторичный полезный оборот.

При увеличенном объеме работ по сносу в зарубежной практике также применяют модифицированную схему, в которой работают 2 экскаватора — один все время меняет навесное оборудование, другой экскаватор-разрушитель постоянно работает с более производительной поворотной головкой универсальных ножниц, которая при монтаже требует больше времени на наладку (Рис. 7).

Экскаваторы-разрушители имеют высокую стрелу для разборки многоэтажных зданий и, обычно, телескопическую систему подъема кабины для улучшения обзора, а в наиболее производительных механизмах на конце стрелы устанавливают еще и видеокамеру, передающую изображение на дисплей экскаваторщику. На объекты с еще большим объемом работ по сносу целесообразно перемещать мобильный дробильно-сортировочный комплекс с магнитным сепаратором. Вначале экскаватор осуществляет разборку здания.—Через мобильный комплекс пропускается весь объем раздробленного сырья, с извлечением магнитной сепарацией до 95% железного лома. По завершении работ комплекс перемещают на соседнюю площадку, а экскаваторы переходят к отгрузке на транспорт лома, бетонных фракции и отправке строительного мусора. За рубежом для перевозок шире используют крупнотоннажные контейнеры с открытым верхом [20, 21]. В странах Западной Европы при доставке лома они экономически более эффективны [22,23].

В свое время активное развитие технологии переработки ЖБИ дала правительственная программа ФРГ по ликвидации блочных зданий и различных железобетонных объектов на территории бывших воинских частей Группы советских войск в Германии. Были полностью рекультивированы значительные территории военных полигонов и воинских частей, демонтированы и переработаны сборно-железобетонные здания казарм, складов, гаражей, а также железобетонных сооружений оборонительного характера.

Для этой технологии характерно в основном местное использование производимой — щебеночной фракции для улучшения состояния покрытия местных дорог, грузовых дворов предприятий, складских площадей, токов сельхозпроизводителей и прочее. В зарубежной практике демонтаж отдаленных конструкций из ЖБИ рассматривается как экологическая услуга, развитие которой стимулируется и субсидируется государством. Заказчиком услуги выступает организация, куда поступает бетонная фракция. Организация — производитель работ получает доход: от продажи товарного лома; от продажи товарной фракции бетонного щебня третьим лицам: от государства, в рамках экологической программы за объем выполненных работ по сносу конструкций из ЖБИ, и от основного заказчика — за объем работ по улучшению дорожного полотна. Технология заслуживает более широкого применения в отечественной практике и в работе ломоперерабатывающих специализированных предприятий.

Литература:

1. Кириченко, С.А., Кириченко А.С. Экспорт лома и макроэкономические тенденции // Вторичные металлы. 2008. №1. с. 44–50.
2. Кириченко, С.А. Перевозка лома через морские порты России // Вторичные металлы. 2009. №2. с. 12–13.
3. Кириченко, С.А., Кириченко А.С. Упущенные возможности при морском экспорте лома // Вторичные металлы. 2009. №6. с. 21.
4. Уточкин, Ю.И., Семин А.Е. Электросталеплавильное производство в России должно преодолеть тридцатилетнее отставание // Электрометаллургия. 2004. №6. с. 2.

5. Чижиков, А. Г., Черноусов П. И., Чижикова И. И. Сырьевая безопасность предприятий черной металлургии РФ // Вторичные металлы. 2010. №5. с. 32.
6. Чижиков, А. Г., Семин А. Е., Черноусов П. И. Среднесрочный прогноз ситуации на рынке черных металлов // Вторичные металлы. 2011. №6. с. 29–30.
7. Сипаро, К. А., Ермолов В. М., Кириченко И. С. Экспорт лома черных металлов. Перевалка лома через российские порты // Вторичные металлы. 2014. №3. с. 36–39.
8. Сипаро, К. А. Перевалка российских внешнеторговых грузов в отечественных и зарубежных портах // Интегрированная логистика. 2014. №3. с. 20–23.
9. Семин, А. Е., Смирнов Н. А. От лома до качественной стали // Электromеталлургия. 2008. №5. с. 44–46.
10. Кириченко, А. С., Сипаро К. А., Букин А. В. Экспорт черного лома и проблемы обеспечения морских перевозок // Вторичные металлы. 2014. №5. с. 20–23.
11. Серегин, А. Н., Кириченко А. С. Авторециклинг в московском регионе // Вторичные металлы. 2013. №5. с. 41–44.
12. Чижиков, А. Г., Семин А. Е., Чижикова И. И. Автомобильный лом в структуре металлофонда России и технические решения по его утилизации // Электromеталлургия. 2010. №4. с. 31–36.
13. Ратнов, А. С., Черноусов П. И. Использование строительного металлолома // Вторичные металлы. 2012. №2. с. 47–50.
14. Юсфин, Ю. С., Черноусов П. И. Утилизация вторичных материальных ресурсов // Металлург. 1998. №2. с. 30.
15. Серегин, А. Н., Ермолов В. М., Степанян А. С., Арсентьев В. А. Технологии и оборудование для утилизации металлоосодержащих отходов // Вторичные металлы. 2009. №5. с. 48–51.
16. Кириченко, В. Н. Ломоперерабатывающие предприятия Европы // Рынок вторичных металлов. 2003. №6. с. 38–40.
17. Кириченко, А. С. Лом из железобетона // Вторичные металлы. 2010. №1. с. 46–47.
18. Супрун, В. Н., Семин А. Е. Плавление лома и предъявляемые к нему требования // Рынок вторичных металлов. 2007. №2. с. 24–26.
19. Кириченко, В. Н. Спецтехника для перевозки лома // Рынок вторичных металлов. 2007. №1. с. 68–68.
20. Гагарский, Э. А., Кириченко С. А., Кириченко А. С. Развитие контейнерных перевозок лома // Бюллетень транспортной информации. 2009. №2. с. 18–21.
21. Гагарский, Э. А., Кириченко С. А., Кириченко А. С. Развитие перевозок насыпных и навалочных грузов в универсальных контейнерах // Бюллетень транспортной информации. 2010. №4. с. 14–18.
22. Гагарский, Э. А., Кириченко С. А. Перевозка металлолома в крупнотоннажных контейнерах // Морские порты России. 2010. №8. с. 68–70.
23. Гагарский, Э. А., Кириченко С. А., Трихунков М. Ф. Тенденции развития контейнерных транспортно-технологических систем на современном этапе // Бюллетень транспортной информации. 2011. №2. с. 3–7.

Большие деформации резиновых мембран

Колпак Евгений Петрович, доктор физико-математических наук, профессор;

Мальцева Любовь Сергеевна, аспирант

Санкт-Петербургский государственный университет

Разработана методика проведения экспериментов по растяжению плоских круглых мембран нормальным давлением. Экспериментальные данные сопоставляются с результатами теоретических исследований. Для расчета эластомерных мембран предлагается использовать нелинейную теорию тонких оболочек.

Ключевые слова: эластомеры, экспериментальные данные, мембрана, деформации, напряжения, упругий потенциал.

Широкое применение в промышленности нашли такие конструкционные материалы, как эластомеры, обладающие нелинейными механическими свойствами. Изделия из них могут испытывать большие, до нескольких сотен процентов, деформации без разрушения. Соответственно, при расчете изделий из эластомеров ис-

пользуется нелинейная теория упругости [11–13, 15–17, 19]. Эластомеры применяются для изготовления мембран, оболочек, силовых и уплотнительных элементов. В расчетах нелинейная связь между напряжениями и деформациями здесь задается с помощью упругого потенциала. В теории тонких оболочек с использованием статиче-

ской гипотезы Кирхгофа ($\sigma_3 \ll \sigma_1, \sigma_2$), закон упругости для несжимаемого материала принимает вид

$$\sigma_i = \lambda_i \frac{\partial \Phi}{\partial \lambda_i} - \lambda_3 \frac{\partial \Phi}{\partial \lambda_3} \quad (i = 1, 2),$$

где $\Phi = \Phi(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$ — упругий потенциал, являющийся для изотропного материала функцией кратностей удлинений λ_1 , λ_2 и λ_3 , σ_1 и σ_2 — напряжения, действующие в срединной поверхности. Для несжимаемого материала должно выполняться условие несжимаемости: $\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 = 1$. На сегодняшний день предлагаемые в литературных источниках потенциалы строятся эмпирически на основе экспериментальных данных, а не на основе статистической теории. К числу таких потенциалов относятся потенциалы Муни — Ривлина, Бартенева — Хазановича, Джента — Томаса, Исихары, Бидермана, Александра, Харт — Смита, Огдена [15, 22]. Некоторые из них достаточно часто используются при решении конкретных задач [13, 15, 20–26, 29, 34, 39]. Ниже будет использоваться степенной потенциал, предложенный К.Ф. Черным (типа Огдена):

$$\Phi = \frac{\mu}{n^2} \left[(1 + \beta) (\lambda_1^n + \lambda_2^n + \lambda_3^n - 3) + 1 - (1 - \beta) (\lambda_1^{-n} + \lambda_2^{-n} + \lambda_3^{-n} - 3) \right], \quad (1)$$

μ — линейный модуль сдвига, n — параметр.

Из этого потенциала следуют потенциалы Бартенева-Хазановича ($n = 1, \beta = 1$), неогоковский ($n = 2, \beta = 1$), Муни-Ривлина ($n = 2$). Теоретическое сопоставление этих потенциалов на основе экспериментальных данных проводилось в [15].

Для определения механических характеристик эластомеров используются различные методики, основанные,

как правило, на одноосном и двухосном растяжении образцов. Авторами работы были поставлены эксперименты по одноосному растяжению резиновых образцов в виде плоских мембран. В качестве испытуемых образцов брались полосы листовой резины различной марки (ГОСТ: ТУ 38.105.116–81, ТУ 38.305.05379–95) шириной от 55 мм до 120 мм, длиной от 150 мм до 400 мм, толщиной от 0.5 мм до 13 мм. Специально изготовленная установка технически позволяла растягивать образец длиной в 200 мм в 6 раз. При таких деформациях в окрестности зажимов в деформируемом образце напряженное состояние значительно отличается от однородного состояния. Состояние близкое к однородному реализуется в окрестности центральной части растянутого образца. В качестве базовой длины образца была принята длина в 200 мм. На недеформированный образец наносилась прямоугольная сетка (с квадратной ячейкой 5x5 мм) с помощью специально изготовленного для этих целей штампа для визуального контроля над искажением сетки на поверхности деформированного образца.

Образец зажимался в зажимы на краях, один край жестко закреплялся, а на втором прикладывалась нагрузка, растягивающая образец. При заданной нагрузке измерялось расстояние между «контрольными» метками, нанесенными на поверхность недеформированного образца на расстоянии 100 мм друг от друга. Нагрузка измерялась специально изготовленным динамометром. В общей сложности эксперименты по одноосному растяжению были проведены на 8 марках резин. Надо отметить, что остаточные деформации во всех экспериментах не превышали 1%, т.е. для теоретического анализа можно использовать нелинейную теорию упругости. Характерная зависимость «нагрузка-деформация» для испытанных марок резин приведена на рис. 1 — символом \circ отмечены экспериментальные точки.

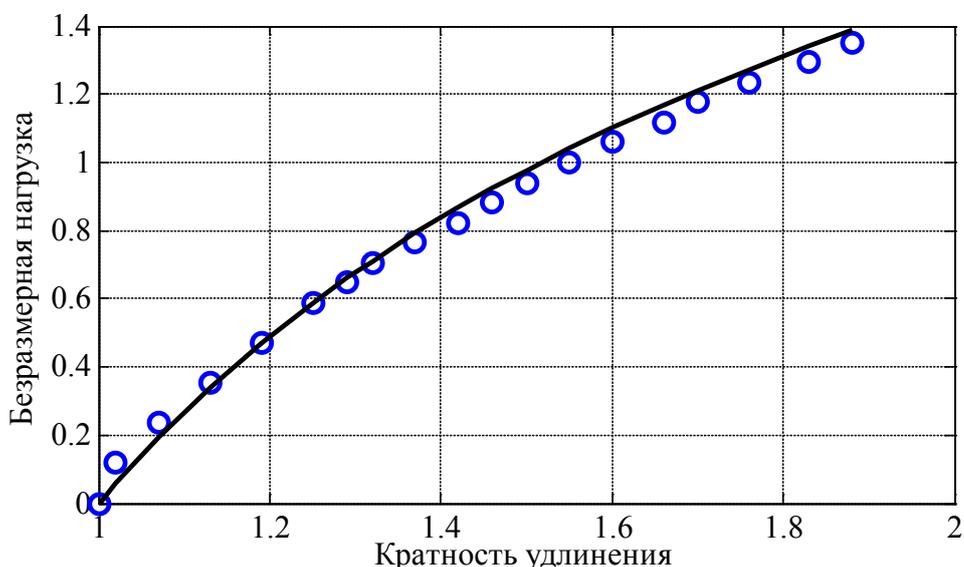


Рис. 1. Зависимость «безразмерная нагрузка — кратность удлинения» для одноосно растянутой резиновой полосы

Для упругого потенциала (1) зависимость «напряжение-деформация» в случае одноосного растяжения задается соотношением

$$P = \frac{2\mu}{n} \frac{1}{\lambda} (\lambda^n - \lambda^{-n/2}),$$

где λ — относительное удлинение образца, значение параметра β принималось равным единице. Экспериментальные данные аппроксимировались этой зависимостью с помощью метода наименьших квадратов. Для случая рис. 1 были получены следующие значения параметров: $\mu = 9$ кг/см², $n = 1.5$. Расчетной зависимости на рис. 1 соответствует сплошная линия. Для всех испытываемых образцов (8 марок резин) параметр n лежал в диапазоне от 1.2 до 1.8, а параметр μ — от 1.5 до 100. Эти результаты согласуются с полученными в [15] данными.

Для проведения экспериментов по растяжению плоских мембран была разработана методика их растяжения нормальным давлением и краевыми нагрузками, аналогичная предложенной в [15] для растяжения прямоугольных мембран. Растяжение мембран производилось по следующей схеме (рис. 2).

В жёстком листе из оргстекла или металла вырезалось круглое отверстие. На жёсткую платформу, в которую вмонтировались два металлических штуцера для подключения манометра и входного клапана, кладалась листовая резина. Сверху устанавливался лист с вырезанным круглым отверстием. Платформа и лист с отверстием жёстко соединялись друг с другом. В данной методике для уменьшения эффекта «выползания» материала из «захватов» между листом резины и листом с отверстием устанавливался лист с отверстием из мелкой наждачной бумаги. Собранный конструкцией устанавливалась на фоне стенки с масштабной сеткой. Через клапан (рис. 2) с помощью насоса небольшими порциями подавался воздух, который и создавал давление на мем-

брану. Для измерения давления использовались как циферблатный, так и водяной манометры. В процессе нагружения мембраны давлением велась съёмка цифровой камерой, по снимкам после компьютерной обработки цифровых изображений строилась форма мембраны при известном давлении. Фотосъёмка велась на расстоянии от 650 мм до 900 мм от стенки, а образец устанавливался на расстоянии около 110 мм от стенки с масштабной координатной сеткой. Предлагаемый метод проведения экспериментального исследования по растяжению круглой мембраны нормальным давлением позволяет сопоставить результаты по одноосному растяжению с результатами по растяжению мембраны нормальным давлением для резин одной и той же марки из одного и того же «листового» материала.

Растяжению нормальным давлением подвергались «круглые» мембраны, изготовленные из листовой резины (толщина листов 1.2, 1.5 и 2 мм), что и в экспериментах по одноосному растяжению полос. Диаметры внутренних контуров 75 мм или 100 мм. На рис. 3 представлен вид на деформированную мембрану сбоку при разных значениях давления, отмеченных на рисунке цифрами (0.24 атм., 0.40 атм., 0.32 атм.).

На рис. 4 показана характерная зависимость «безразмерное давление-безразмерный прогиб в центре мембраны» — экспериментальные точки отмечены символом \circ . В качестве «безразмерного прогиба» использовалось отношение прогиба мембраны в центре ($z(0)$) к радиусу опорного контура R ($z(0)/R$), а в качестве давления — отношение произведения давления q на радиус опорного контура к произведению модулю сдвига μ на толщину недеформированной мембраны h ($qR/\mu h$). Во всех поставленных экспериментах зависимость «нагрузка-деформация» имела точку максимума. Точка максимума (рис. 4) достигалась практически сразу после выхода мембраны в окрестности зоны защемления за точки опорного контура (рис. 3, $q = 0.32$).

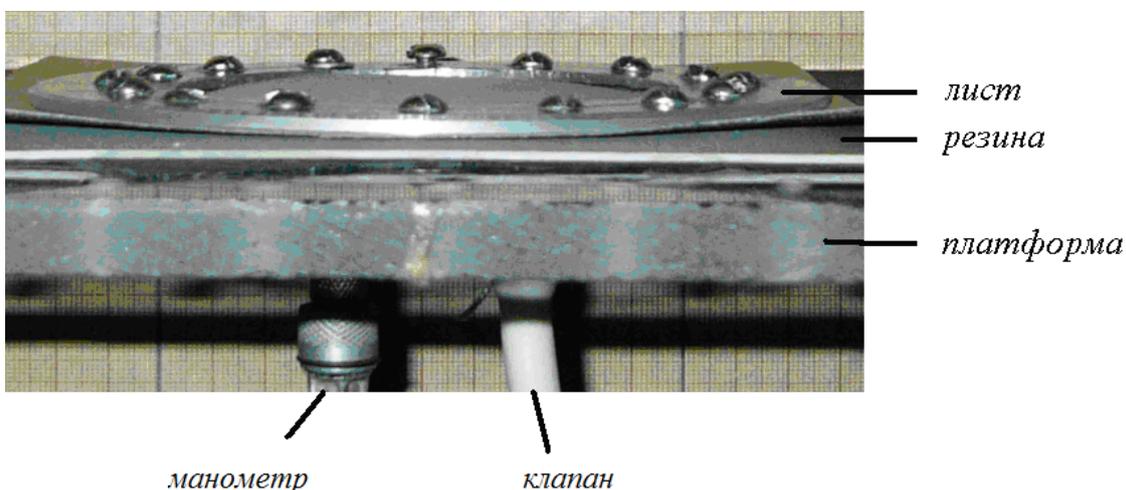


Рис. 2. Вид сбоку на установку, предназначенную для растяжения круглой мембраны нормальным давлением

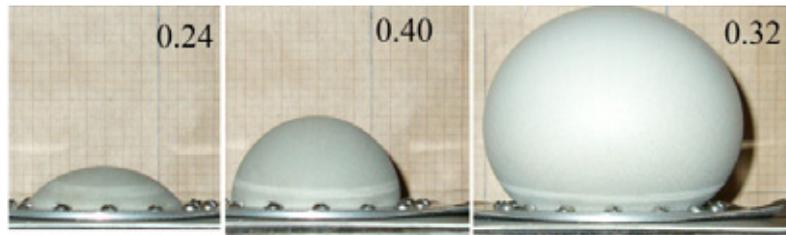


Рис. 3. Вид на деформированную нормальным давлением круглую мембрану при различных давлениях (0.24 атм., 0.40 атм., 0.32 атм.)

В качестве моделей мембран и оболочек использовалась нелинейная безмоментная теория оболочек. Уравнения равновесия осесимметричной деформации оболочки вращения для случая нормального давления имеют следующий вид [13, 15]:

$$\frac{d}{dr} \left(r \frac{1}{\lambda_1} T_1 \frac{dr}{dr} \right) - T_2 - qr \frac{dz}{dr} = 0,$$

$$\frac{d}{dr} \left(r \frac{1}{\lambda_1} T_1 \frac{dz}{dr} \right) + qr \frac{dr}{dr} = 0,$$

$$\frac{dr}{dr} = \lambda_1 \cos \varphi, \quad \frac{dz}{dr} = -\lambda_1 \sin \varphi.$$

В этих соотношениях φ — угол между осью вращения и нормалью к срединной поверхности в деформированной конфигурации, T_1 и T_2 — усилия, действующие в срединной поверхности в меридиональном и окружном направлениях, а λ_1 и λ_2 — кратности удлинений.

Связь между усилиями и кратностями удлинений для упругого потенциала (1) с $\beta = 1$ задается соотношениями

$$T_1 = \frac{2h\mu}{n\lambda_1} (\lambda_1^n - \lambda_3^n), \quad T_2 = \frac{2h\mu}{n\lambda_2} (\lambda_2^n - \lambda_3^n).$$

В качестве граничных условий рассматривались следующие:

$$\text{при } r^0 = 0: r = 0, \varphi = 0;$$

$$\text{при } r^0 = R: r = R, z = 0.$$

Предлагаемая система нелинейных уравнений решалась с применением двух алгоритмов, разработанных для решения краевых задач для нелинейных уравнений в частных производных [3–6, 14, 16, 18]. В одном случае осуществлялась дискретизация дифференциальных операторов конечными разностями. Полученная система нелинейных алгебраических уравнений решалась с применением метода простой итерации. В другом случае краевая задача сводилась к решению задачи Коши для системы обыкновенных дифференциальных уравнений. Полученные обоими методами теоретические результаты дали хорошее совпадение с экспериментальными. На рис. 2

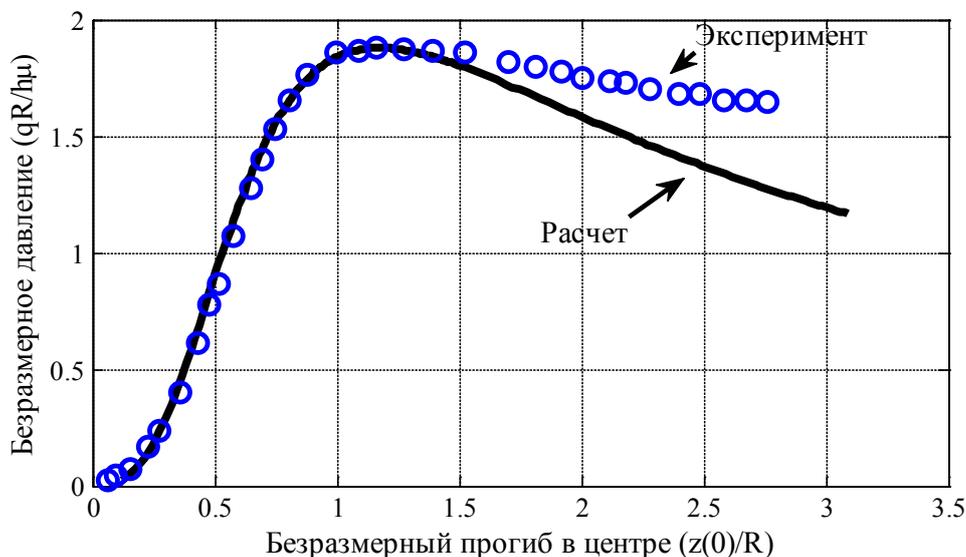


Рис. 4. Расчетная и экспериментальная зависимости «безразмерное давление — безразмерный прогиб» для круглой мембраны, растянутой нормальным давлением

расчетной зависимости (неогуковский потенциал, $n = 2$) соответствует сплошная линия.

Как следует из анализа экспериментальных и теоретических результатов по одноосному растяжению и двухосному растяжению нормальным давлением образцов, изготовленных из одного и того же «листового» материала, такие зависимости, как «напряжение-деформация» описываются различными потенциалами. Это можно объяснить тем, что внутренняя перестройка макромолекул образцов при одноосном и двухосном неоднородном напряженных состояниях происходит по-разному. Возможно также, что по интегральным характеристикам типа «напряжение-деформация» для двухосного напряженного состояния строить упругий потенциал не вполне корректно. Вместе с этим теоретические результаты достаточно хорошо согласуются с экспериментальными результатами (рис. 4).

Физические свойства мембран могут быть и неоднородными — при их изготовлении могут возникать внутренние жесткие включения разного размера, внутренние микропоры и трещины, поверхностные дефекты. Решение математических задач с особенностями такого рода разработаны, для линейных уравнений теории упругости [1, 2, 7–10, 27, 28, 30–33, 35–37, 41]. Толщина в разных частях мембраны может быть разной. При больших деформациях искажения в напряженно-деформированном состоянии могут возникать и в зонах закрепления мембран. Неоднородности такого рода в нелинейной теории упругости, в отличие от линейной теории [10], практически, не исследовались. При расчете мембран, работающих в различных средах и при разных температурных режимах можно в первом приближении использовать методы расчета, разработанные [34, 38–40, 42, 43] в рамках линейной теории упругости.

Литература:

1. Гасратова, Н.А. Напряженно-деформированное состояние упругого пространства со сферическим жестким включением // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 10: Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. — 2009. — №1. — с. 14–18.
2. Гасратова, Н.А. Решение некоторых классических пространственных задач теории упругости в напряжениях // Молодой ученый. — 2014. — №3 (62). — с. 1–6.
3. Гасратова, Н.А., Бойцов Д.С., Габриелян Л.А., Тюганова Т.М. Математическая модель иммунного ответа организма млекопитающих на поражение кожи ожогом // Молодой ученый. — 2014. — №12 (71). — с. 1–7.
4. Гасратова, Н.А., Бойцов Д.С., Крылова В.А., Гаврилова А.В. Модель Базыкина-Свирижева хищник-жертва // Молодой ученый. — 2014. — №12 (71). — с. 8–12.
5. Гасратова, Н.А., Столбовая М.В., Бойцов Д.С., Степанова Д.С. Математическая модель хищник-жертва на линейном ареале // Молодой ученый. — 2014. — №11. — с. 1–10.
6. Гасратова, Н.А., Столбовая М.В., Неверова Е.Г., Бербер А.С. Математическая модель «ресурс-потребитель» // Молодой ученый. — 2014. — №10 (69). — с. 5–14.
7. Гасратова, Н.А., Шамина В.А. Об одном подходе к решению осесимметричных задач линейной теории упругости // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 1: Математика. Механика. Астрономия. — 2007. — №2. — с. 101–106.
8. Гасратова, Н.А., Шамина В.А. Решение в напряжениях линейной осесимметричной задачи для сферы и упругого пространства со сферической полостью // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 1: Математика. Механика. Астрономия. — 2008. — №2. — с. 122–128.
9. Даль, Ю.М., Пронина Ю.Г. Деформация шаровой поры в нелинейно-упругом теле // Известия Российской академии наук. Серия физическая. — 2006. — Т. 70. — №9. — с. 1341–1343.
10. Даль, Ю.М., Пронина Ю.Г. Сосредоточенные силы и моменты у границы упругой полуплоскости // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. — 1998. — №5. — с. 78.
11. Кабриц, С.А., Мальков В.М., Мансурова С.Е. Математическое моделирование нелинейной деформации эластомерного слоя // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 10: Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. — 2011. — №3. — с. 56–63.
12. Кабриц, С.А., Мальков В.М., Мансурова С.Е. Нелинейные уравнения плоского слоя для трех моделей эластомерного материала // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. — 2001. — №1. — с. 38.
13. Кабриц, С.А., Черных К.Ф. Нелинейная теория изотропно упругих тонких оболочек с учетом поперечного сдвига // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. — 1996. — №1. — с. 124.
14. Колесин, И.Д., Старков В.Н., Гасратова Н.А. Одиночная популяция под антропогенным давлением // Журнал научных публикаций аспирантов и докторантов. — 2014. — №6 (96). — с. 226–232.
15. Колпак, Е.П. Устойчивость и закритические состояния безмоментных оболочек при больших деформациях // диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук/Санкт-Петербург, 2000.
16. Колпак, Е.П. Matlab: методы вычислений учебное пособие/Е.П. Колпак; Санкт-Петербургский гос. ун-т. Санкт-Петербург, 2007.

17. Колпак, Е. П. Введение в механику сплошных сред учебное пособие/Е. П. Колпак; С.-Петербург. гос. ун-т. СПб. 2004.
18. Колпак, Е. П., Жукова И. В., Степанова Д. С., Крицкая А. В. О численных методах решения эволюционных уравнений на примере математической модели «хищник-жертва» // Молодой ученый. — 2014. — № 4 (63). — с. 20–30.
19. Мальков, В. М., Кабриц С. А., Мансурова С. Е. Математическое моделирование нелинейной деформации эластомерного слоя // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 10: Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. — 2011. — № 3. — с. 56–63.
20. Мальков, В. М., Малькова Ю. В. Анализ сингулярности напряжений в нелинейной задаче Фламана для некоторых моделей материала // Прикладная математика и механика. — 2008. — Т. 72. — № 4. — с. 652–660.
21. Мальков, В. М., Малькова Ю. В. Исследование нелинейной задачи Фламана // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. — 2006. — № 5. — с. 68–78.
22. Мальков, В. М., Малькова Ю. В. Нелинейная задача Фламана для материала Бартенева-Хазановича // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 10: Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. — 2005. — № 1–2. — с. 49–55.
23. Мальков, В. М., Малькова Ю. В. Нелинейная задача Фламана для несжимаемого материала // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 1: Математика. Механика. Астрономия. — 2004. — № 4. — с. 73–82.
24. Мальков, В. М., Малькова Ю. В. Плоская задача нелинейной упругости для гармонического материала // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 1: Математика. Механика. Астрономия. — 2008. — № 3. — с. 114–126.
25. Мальков, В. М., Малькова Ю. В. Плоские задачи о сосредоточенных силах для полулинейного материала // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 10: Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. — 2013. — № 3. — с. 83–96.
26. Мальков, В. М., Малькова Ю. В. Плоские задачи упругости для полулинейного материала // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 1: Математика. Механика. Астрономия. — 2012. — № 3. — с. 93–106.
27. Мальков, В. М., Малькова Ю. В., Иванов В. А. Бесконечная плоскость с круговым включением, имеющим отслоение на части границы // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 10: Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. — 2009. — № 4. — с. 152–165.
28. Мальков, В. М., Малькова Ю. В. Трещина в форме дуги окружности, расположенная вблизи поверхности раздела материалов // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 1: Математика. Механика. Астрономия. — 2010. — № 1. — с. 93–104.
29. Мальков, В. М., Малькова Ю. В., Степанова В. А. Двухкомпонентная плоскость из материала Джона с межфазной трещиной, нагруженной давлением // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 1: Математика. Механика. Астрономия. — 2013. — № 3. — с. 113–125.
30. Пронина, Ю. Г. Оценка долговечности упругой трубы под действием продольной силы и давления в условиях равномерной поверхностной коррозии // Деформация и разрушение материалов. — 2009. — № 2. — с. 41–45.
31. Пронина, Ю. Г. Периодическая задача о точечных воздействиях в упругой полуплоскости с отверстиями // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 10: Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. — 2009. — № 3. — с. 118–128.
32. Пронина, Ю. Г. Сосредоточенные силы и моменты в упругой полуплоскости с отверстием // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 10: Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. — 2009. — № 2. — с. 104–114.
33. Пронина, Ю. Г. Центры расширения-сжатия в упругой полуплоскости // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 1: Математика. Механика. Астрономия. — 2007. — № 2. — с. 140–149.
34. Пронина, Ю. Г. Механохимическая коррозия полого цилиндра из идеального упруго-пластического материала под действием постоянного давления // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 1: Математика. Механика. Астрономия. — 2006. — № 3. — с. 121–130.
35. Пронина, Ю. Г. Влияние поверхностных факторов на напряженно-деформированное состояние твердых тел с отверстиями // диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук/Санкт-Петербургский государственный университет. Санкт-Петербург, 2010.
36. Пронина, Ю. Г. Краевая дислокация и сосредоточенная сила в упругой полуплоскости с отверстиями и краевыми вырезами // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 1: Математика. Механика. Астрономия. — 2012. — № 4. — с. 120–124.
37. Пронина, Ю. Г. О сосредоточенных воздействиях у границы упругой пластины // Труды ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова. — 2010. — № 53. — с. 117–122.

38. Пронина, Ю.Г. Оценка устойчивости упругой трубы под давлением коррозионных сред // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 10: Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. — 2006. — №3. — с. 55–63.
39. Пронина, Ю.Г. Равномерная механохимическая коррозия полой сферы из идеального упругопластического материала под действием постоянного давления // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 1: Математика. Механика. Астрономия. — 2009. — №1. — с. 113–122.
40. Пронина, Ю.Г. Расчет долговечности упругой трубы под действием продольной силы, давления и осесимметричного нагрева в условиях равномерной коррозии // Проблемы прочности и пластичности. — 2009. — №71. — с. 129–135.
41. Dal' Yu. M., Pronina Yu. G. On concentrated forces and moments in an elastic half-plane // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 1: Математика. Механика. Астрономия. — 1998. — №1. — с. 57–60.
42. Pronina, Y. Analytical solution for the general mechanochemical corrosion of an ideal elastic-plastic thick-walled tube under pressure // International Journal of Solids and Structures. — 2013. — Т. 50. — №22–23. — с. 3626–3633.
43. Pronina, Y. G. Estimation of the life of an elastic tube under the action of a longitudinal force and pressure under uniform surface corrosion conditions // Russian metallurgy (Metally). — 2010. — Т. 2010. — №4. — с. 361–364.

Ошибка преобразования в пространство лучей

Коробков Михаил Александрович, аспирант
Рязанский государственный радиотехнический университет

Рассмотрена причина возникновения ошибки, возникающей в результате выполнения преобразования в пространство лучей, применяемого к однородным кольцевым антенным решёткам (ОКАР). Исследован характер её зависимости при различных конфигурационных параметрах ОКАР. Приведены соответствующие зависимости.

Введение. Кольцевые антенные решётки (АР) находят свое применение в различных областях, например в таких как многоантенные коммуникационные передатчики, навигация и электронная разведка. Более того, однородная кольцевая антенная решётка (ОКАР) имеет одинаковые характеристики, не зависящие от углов прихода волн, излучённых источником радиоизлучения (ИРИ), и может одновременно оценивать углы азимута и места. Для того чтобы иметь возможность работать с вычислительно-эффективными пеленгационными алгоритмами, к ОКАР применяется так называемый переход в пространство лучей. Он преобразует вектор отклика ОКАР к необходимой структуре Вандермонда, после чего для определения координат ИРИ могут быть применены методы, подобные алгоритму Root-MUSIC и ESPRIT [1], [2].

Преобразование в пространство лучей работает только при выполнении некоторых условий конфигурации АР, которые могут быть трудновыполнимы для некоторых практических приложениях. Например, когда используется ОКАР с малым количеством элементов (от шести до десяти), остаточная ошибка, вызванная преобразованием в пространство лучей, вносит смещение в оценки определения координат ИРИ.

Цель статьи — рассмотреть причины возникновения ошибки, вызванной переходом в пространство лучей и исследовать характер изменения её величины при различных конфигурационных параметрах ОКАР.

1. Модель сигнала

Рассмотрим ОКР, состоящую из N антенных элементов. Предположим, что излучают L источников ($L < N$). Передатчики излучают узкополосные сигналы с направлений $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_L$, где φ — азимут. Более того предположим, что доступно K выборок сигнала. Выходная матрица \mathbf{X} размера $N \times K$ может быть записана следующим образом:

$$\mathbf{X} = \mathbf{A}\mathbf{S} + \mathbf{N} \quad (1)$$

где \mathbf{A} — это матрица отклика ОКАР, размера $N \times L$ в пространстве элементов, \mathbf{S} — сигнальная матрица или матрица источников размера $L \times K$, \mathbf{N} — матрица шума, размера $N \times K$. Шум смоделирован как стационарный, с нулевым средним, пространственный и временной белый комплексный гауссовский процесс. Матрица отклика в пространстве элементов для ОКАР записывается как $\mathbf{A} = [\mathbf{a}_1(\xi, \varphi), \dots, \mathbf{a}_L(\xi, \varphi)]$, каждый вектор которой составлен из векторов

$$\mathbf{a}_l(\vartheta) = \left[e^{j\zeta \cos(\varphi_l - \gamma_0)}, e^{j\zeta \cos(\varphi_l - \gamma_1)}, \dots, e^{j\zeta \cos(\varphi_l - \gamma_{(N-1)})} \right]^T \quad (2)$$

для $l = 1, 2, \dots, L$. Здесь $\vartheta = (\zeta, \varphi)$, $\zeta = kr \sin(\theta)$, r — радиус решётки, $k = 2\pi/\lambda$ волновое число, λ — длина волны, $\gamma_n = (2\pi n)/(N)$ ($n = 0, \dots, N-1$) — угловое положение антенных элементов. Угол места θ измеряется вниз по оси z . Азимут φ измеряется против часовой стрелки по оси x ; см. рисунок 1.

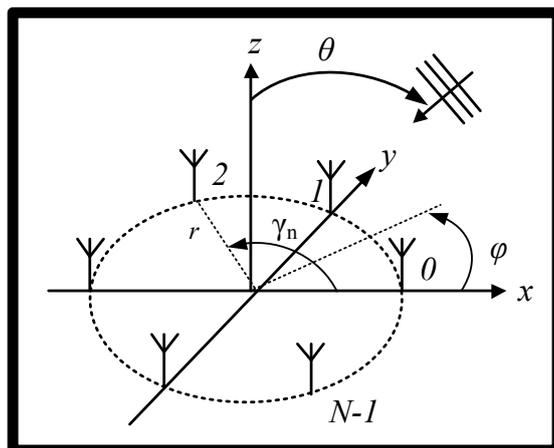


Рис. 1. ОКАР с N элементами

2. Режим возбуждения фазовой моды

В этом разделе, рассматривается режим или принцип возбуждения фазовой модой [1], [2]. Сначала рассматривается непрерывная кольцевая апертура. Такая модель не может быть реализована на практике, но это самая подходящая конфигурация для применения принципа возбуждения фазовой моды, которая не приводит к появлению ошибок. Затем рассматривается дискретная АР, которую можно реализовать на практике.

2. А. Непрерывная кольцевая апертура

В случае непрерывной кольцевой апертуры, любая функция возбуждения является периодической по γ с периодом 2π и поэтому может быть представлена рядом Фурье [1], [2], [3]. Генерируемая функция возбуждения $\omega(\gamma)$ может быть определена, используя обратное преобразование Фурье $\omega(\gamma) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} c_m e^{jm\gamma}$, где m -ая фазовая мода $\omega_m(\gamma) = e^{jm\gamma}$ представляется как пространственная гармоника возбужденной решётки, c_m — соответствующий коэффициент ряда Фурье, а γ представляет угловое положение точки, которая передвигается непрерывно в кольцевой апертуре.

Интегрируя пространственную гармонику возбужденной решётки $\omega(\gamma)$ по всей непрерывной кольцевой решётке, мы можем вычислить нормированную диаграмму направленности в дальней зоне $f_m^c(\vartheta)$, которая для m -ой фазовой моды вычисляется как [1], [2]:

$$f_m^c(\vartheta) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \omega_m(\gamma) e^{j\zeta \cos(\phi-\gamma)} d\gamma \quad (3)$$

Выражение (3) также может быть представлено с помощью функции Бесселя:

$$f_m^c(\vartheta) = j^m J_m(\zeta) e^{jm\phi} \quad (4)$$

где $J_m(\zeta)$ — это функция Бесселя первого рода порядка m .

Диаграмма направленности в дальней зоне $f_m^c(\vartheta)$ имеет схожее с функцией возбуждения азимутальное отклонение $e^{jm\phi}$. Это свойство позволяет использовать для синтеза диаграммы направленности режим возбуждения фазовой моды [1]. Вместо амплитудной и угломестной зависимости диаграммы направленности в дальней зоне она выражается через функцию Бесселя. Поэтому в данной кольцевой апертуре может возбуждаться только ограниченное число фазовых мод. Наивысший порядок моды M — наименьшее целое число, максимально близко расположенное к kr . Таким образом, порядок мод будет $m \in [-M, M]$.

2. Б. ОКАР

ОКАР — это случай решётки с непрерывной апертурой при конечном числе элементов решетки, равномерно распределённых по всей длине окружности; см. рисунок 1.

Для ОКАР, нормированный весовой вектор формирования луча, который возбуждает решётку фазовой модой $m \in [-M, M]$ [1], [2]:

$$\mathbf{w}_m^H = \frac{1}{N} [e^{jm\gamma_0}, e^{jm\gamma_1}, \dots, e^{jm\gamma_{N-1}}] \quad (5)$$

где γ_n — это угловое положение n -го элемента, $(\cdot)^H$ знак эрмитова сопряжения. Тогда:

$$f_m^s(\vartheta) = \mathbf{w}_m^H \mathbf{a}(\vartheta) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} e^{jm\gamma_n} e^{j\zeta \cos(\phi-\gamma_n)} \quad (6)$$

где $\mathbf{a}(\vartheta)$ — вектор отклика в пространстве элементов (2). Для моды порядка $|m| \leq M$, выражение (6) может быть переписано [1], [2]:

$$f_m^s(\vartheta) = j^m J_m(\zeta) e^{jm\phi} + \sum_{q=1}^{\infty} (j^g J_g(\zeta) e^{-jg\phi} + j^h J_h(\zeta) e^{jh\phi}) = j^m J_m(\zeta) e^{jm\phi} + \varepsilon_m \quad (7)$$

где переменная ϵ_m отображает сумму, приведённую выше, а индексы g и h определяются как $g = Nq - m$ и $h = Nq + m$.

Выражение (7) состоит из двух слагаемых. Первое слагаемое называется основной компонентой и идентично описанию диаграммы направленности решётки в дальней зоне для непрерывной антенной решётки. Второе слагаемое ϵ_m называется остаточной компонентой, возникающей из-за дискретизации непрерывной апертуры на N элементов. Эта компонента известна как искажающая мода высокого порядка, порядок которой необходимо минимизировать для получения максимально приближенных к идеальным (непрерывной апертуре) характеристикам [2].

Обратите внимание, что, несмотря на то, что остаточная компонента ϵ_m представляет собой сумму из бесконечного количества элементов, только первый элемент, с индексом $q = 1$, является значительным [1].

3. Анализ влияния параметров ОКАР на величину остаточной компоненты

Рассмотрим более детально выражения для остаточной компоненты (7). Очевидно, что она зависит от угла места и азимута. Следовательно, систематическая ошибка в оценках определения координат не является постоянной, а зависит от угла прихода сигнала. На рисунке 3 показана угловая зависимость остаточной компоненты как функции ϕ и θ . Значение ϵ_m уменьшается при изменении угла места с 90° до 0° , в то время как она ведет себя подобно синусоиде при изменении азимута.

Проанализируем поведение остаточной компоненты как функции различных параметрах конфигурации ОКАР. Очевидно, что чем ближе приближение к непрерывной апертуре, тем меньше становится остаточная компонента. Принято, что остаточная компонента в (7) может рассматриваться как достаточно малая, если $\epsilon_m \leq 0,01$ [2].

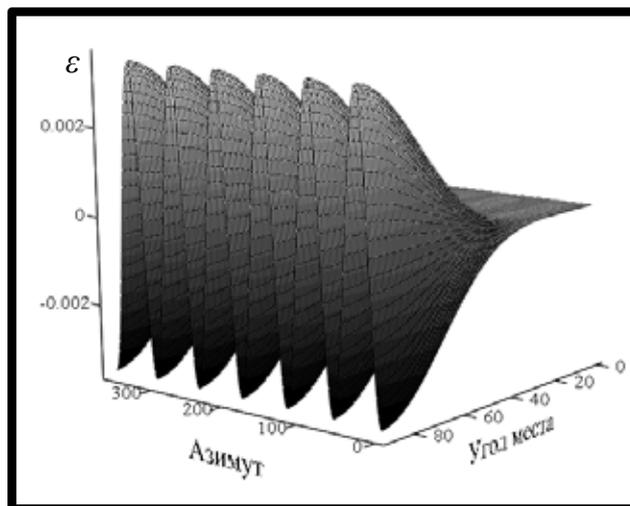


Рис. 2. Зависимость величины остаточной компоненты от координат ИРИ

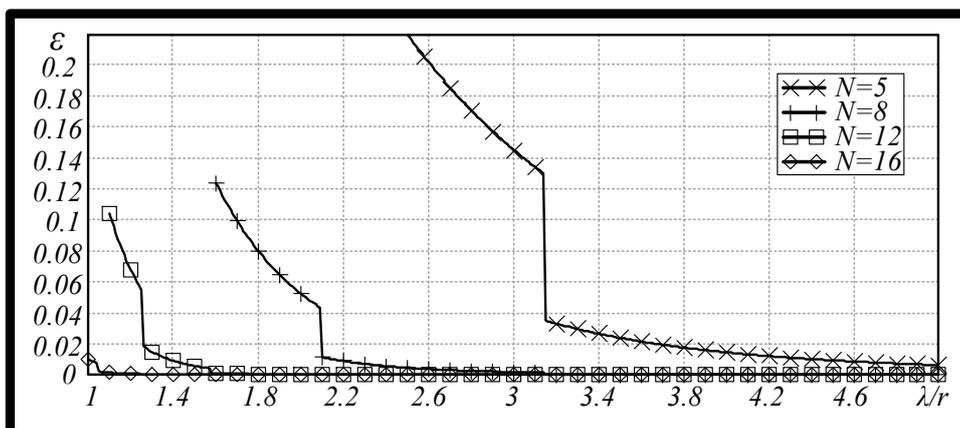


Рис. 3. Зависимость величины остаточной компоненты от радиуса ОКАР при различном количестве элементов

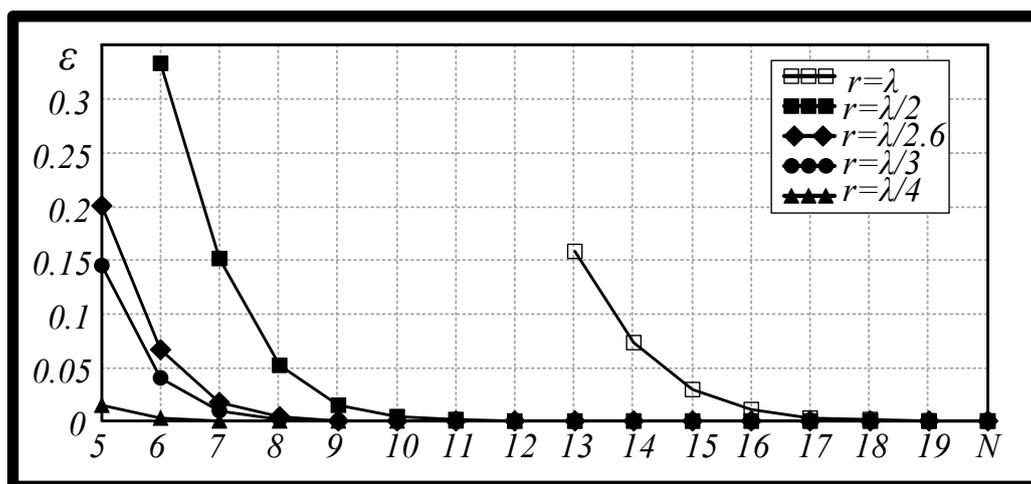


Рис. 4. Зависимость величины остаточной компоненты от количества элементов ОКАР при фиксированных значения радиуса

На рисунке 3, отображена остаточная компонента как функция радиуса, для ОКАР с различным количеством элементов. Интересно отметить, что поскольку M пропорционально r (наименьшее целое число или эквивалентное kr), каждый раз, когда изменяется значение M , происходит скачок функции.

Из графиков, приведённых на рисунке 3, следует, что для фиксированного радиуса ОКАР, величина остаточной компоненты уменьшается при росте числа элементов ОКАР. Однако, при фиксированном количестве элементов, при увеличении радиуса, величина остаточной компоненты возрастает.

На рисунке 4 отображены численные результаты, показывающие зависимость остаточной компоненты

от обоих параметров: числа элементов и радиуса решётки.

Из графиков, приведённых на рисунке 4, следует, что для фиксированного количества элементов решётки величина остаточной компоненты растёт при увеличении радиуса. Однако для фиксированного радиуса она уменьшается при увеличении количества элементов решётки.

Заключение. Применение вычислительно эффективных корреляционных алгоритмов пеленгования к ОКАР требует перехода в пространство лучей, который порождает ошибку, вызванную дискретной структурой ОКАР. Была рассмотрена причина возникновения ошибки, а также исследован характер её зависимости при различных конфигурационных параметрах ОКАР.

Литература:

1. C.P. Mathews and M.D. Zoltowski, «Eigenstructure techniques for 2-D angle estimation with uniform circular arrays,» «IEEE Trans. Signal Process.», vol. 42, no. 9, pp. 2395–2407, Sep. 1994.
2. F. Belloni and V. Koivunen, «Unitary root-MUSIC technique for uniform circular array,» in Proc. 3rd Int. Symp. Signal Process. Inf. Technol. (ISSPIT), Darmstadt, Germany, Dec. 14–17, 2003.
3. F. Belloni, A. Richter, and V. Koivunen, «Reducing excess variance in beamspace methods for uniform circular array,» in Proc. IEEE Work shop Statist. Signal Process. (SSP), Bordeaux, France, Jul. 17–20, 2005.

Метод сокращения вычислительных затрат в алгоритме UCA-Root-Rare

Коробков Михаил Александрович, аспирант
Рязанский государственный радиотехнический университет

Рассмотрена методика сокращения вычислительных затрат при выполнении алгоритма UCA-Root-Rare, за счёт сокращения степени полинома. Приведены формулы расчета максимальной степени усечения. Приведены результаты численного моделирования.

Введение. Оценивание местоположения множества источников радиоионизации (ИРИ) узкополосных сигналов является классической задачей в рамках обработки информации, полученной АР. При оценивании координат ИРИ могут использоваться корреляционные алгоритмы [1]. Существующие корреляционные алгоритмы принято делить на два класса: требующие выполнения двумерного поиска и свободные от него. Применение свободного от двумерного поиска алгоритма Root-MUSIC к однородной кольцевой антенной решётке (ОКАР) не возможно напрямую. Однако модификация алгоритма Root-MUSIC применительно к ОКАР существует и в зарубежной литературе обозначается как UCA-Root-Rare [2]. Выполнение данного алгоритма связано с нахождением корней полинома [3]. Проведённые исследования этого полинома показывают, что он обладает свойствами, которые позволяют сократить его степень без потери значимых корней, соответствующих координатам ИРИ.

Цель статьи — разработать метод, позволяющий уменьшить вычислительные затраты, используя свойства полинома, получаемого в результате выполнения алгоритма UCA-Root-Rare. Получить ограничения применения предлагаемого метода. Привести результаты численного моделирования.

1. Алгоритм UCA-Root-Rare

Вычисление азимута ИРИ при помощи алгоритма UCA-Root-Rare предполагает нахождение корней следующего полиномиального уравнения:

$$f_{RARE}(z)|_{|z|=1} = \det \left\{ \mathbf{T}(1/z)^T \mathbf{E}_{N_b} \mathbf{E}_{N_b}^H \mathbf{T}(z) \right\} = 0 \quad (1)$$

Описание переменных уравнения (1), а также последовательность его получения приведены в [2].

2. Предлагаемое решение

Получаемый в результате нахождения определителя (1) полином, обладает следующими свойствами:

- 1) общее число корней и степень полинома $\eta = (2M + 1)^2 - 1$;
- 2) если z является корнем уравнения (1), то $1/z^*$ также является корнем уравнения (1), где $*$ — знак комплексного сопряжения. Это означает, что любому корню, находящемуся внутри единичной окружности со-

ответствует корень, расположенный с внешней стороны окружности;

3) если z является корнем уравнения (1), то $-z$ также является корнем уравнения (1). Это означает, что любому корню уравнения (1) соответствует корень, находящийся симметрично относительно начала координат. Иными словами, корню z соответствует корень $z \pm \pi$;

4) коэффициенты полинома являются комплексными числами, за исключением коэффициента при степени $\eta/2$;

5) коэффициенты являются симметричными комплексно-сопряжёнными числами, относительно коэффициента при степени $\eta/2$.

На рисунке 1 в логарифмическом масштабе отображены модули коэффициентов полинома, полученные при $N = 12$, $L = 3$, $\Delta = 0.4\lambda$, $M = 4$. На рисунке 1 символом «•» обозначен модуль коэффициента.

Как следует из рисунка 1, имеется $\nu_1 + \nu_2$ коэффициентов, расположенных подряд, модуль которых имеет значение много меньше чем, остальных $\eta - (\nu_1 + \nu_2) + 1$ коэффициентов. Здесь ν_1 — число коэффициентов, стоящих при малых степенях, ν_2 — число коэффициентов, стоящих при старших степенях полинома. Следовательно, можно сделать предположение, что сокращение степени полинома, путем удаления ν_1 слагаемых «спереди» и ν_2 слагаемых «сзади» полинома не приведет к потере значимых корней, соответствующих угловым положениям ИРИ. В общем случае, согласно свойствам 4 и 5, следует сделать вывод, что $\nu_1 = \nu_2 = \nu$. Тогда число удаляемых коэффициентов составит 2ν .

Значение ν может быть рассчитано по следующей формуле, которая получена эмпирическим путем, в результате численного анализа:

$$\nu = M^2 + M + \sum_{b=0}^{M-L} (2 \cdot b) \quad (2)$$

Из приведённого выражения видно, что число усекаемых коэффициентов не зависит от параметров сигналов, а зависит только от параметров конфигурации ОКАР M и числа ИРИ L .

Используя формулу (2) можно составить таблицу 1 а), которая покажет максимально допустимое число усекаемых коэффициентов ν при младших или старших степенях полинома. Соответственно общее число усекаемых коэффициентов составит 2ν . В таблице 1 б) приведено оставшиеся число коэффициентов после усечения полинома справа и слева.

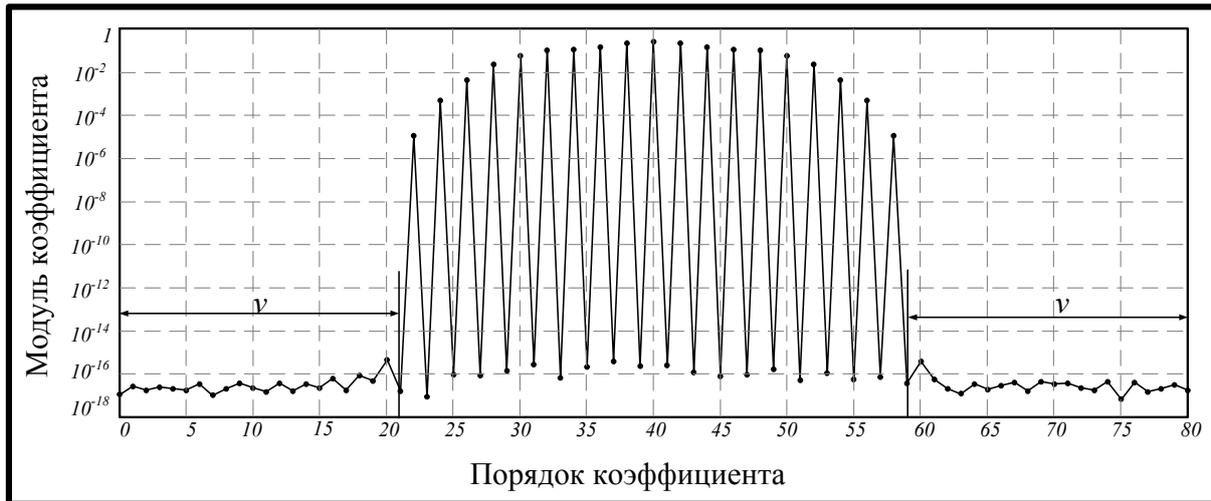


Рис. 1. Модули коэффициентов полинома, полученного при $N = 12, L = 3, \Delta = 0.4\lambda, M = 4$

Символом «х» в таблице 1 отображены значения M и L , при которых алгоритм UCA-Root-Rare оказывается не работоспособным. Очевидно, что эти значения удовлетворяют неравенству $M < L$. Это отнюдь не означает, что полином не имеет корней. Просто корни не соответствуют координатам азимута ИРИ. Корней в этих случаях также η . Таблица 1 а) отображена в виде графических зависимостей на рисунке 3.

Приведённые зависимости на рисунке 3 показывают, что число отсекаемых корней уменьшается при увеличении числа ИРИ L при фиксированном значении M . Следует обратить внимание на тот факт, что после усечения полинома справа и слева, оставшиеся коэффициенты нумеруются с 0.

3. Моделирование

Моделирование предлагаемого решения уменьшения вычислительных затрат, проводится для ОКАР с

$N = 8, \Delta = 0.4\lambda$. Число ИРИ $L = 2$ с координатами $(\varphi_1 = 35^\circ, \theta_1 = 45^\circ)$ $(\varphi_2 = 300^\circ, \theta_2 = 85^\circ)$, отношение сигнал-шум $SNR = 21$ дБ. На рисунке 4 приведены результаты вычисления корней полинома, полученного в результате нахождения координат алгоритмом UCA-Root-Rare. На рисунке 4 символом «▲» отображены заданные координаты азимута ИРИ, символом «○» корни не модифицированного полинома, символом «•» корни модифицированного полинома.

Результаты проведённого моделирования показывают, что корни модифицированного полинома равны корням не модифицированного полинома, за исключением корней, расположенных кольцом вблизи центра окружности и им симметричных корней, удовлетворяющих свойству 2. При этом сохраняются все значимые корни, соответствующие заданным азимутальным положениям ИРИ. Следовательно, предлагаемый метод уменьшения вычислительных затрат может быть использован для алгоритма UCA-Root-Rare.

M/L	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	2	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2	8	6	x	x	x	x	x	x	x	x
3	18	14	12	x	x	x	x	x	x	x
4	32	26	22	20	x	x	x	x	x	x
5	50	42	36	32	30	x	x	x	x	x
6	72	62	54	48	44	42	x	x	x	x
7	98	86	76	68	62	58	56	x	x	x
8	128	114	102	92	84	78	74	72	x	x
9	162	146	132	120	110	102	96	92	90	x
10	200	182	166	152	140	130	122	116	112	110

а)

M/L	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	5	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2	9	13	x	x	x	x	x	x	x	x
3	13	21	25	x	x	x	x	x	x	x
4	17	29	37	41	x	x	x	x	x	x
5	21	37	49	57	61	x	x	x	x	x
6	25	45	61	73	81	85	x	x	x	x
7	29	53	73	89	101	109	113	x	x	x
8	33	61	85	105	121	133	141	145	x	x
9	37	69	97	121	141	157	169	177	181	x
10	41	77	109	131	161	181	197	209	217	221

б)

Рис. 2. а) число отсекаемых коэффициентов v ; б) оставшиеся число коэффициентов

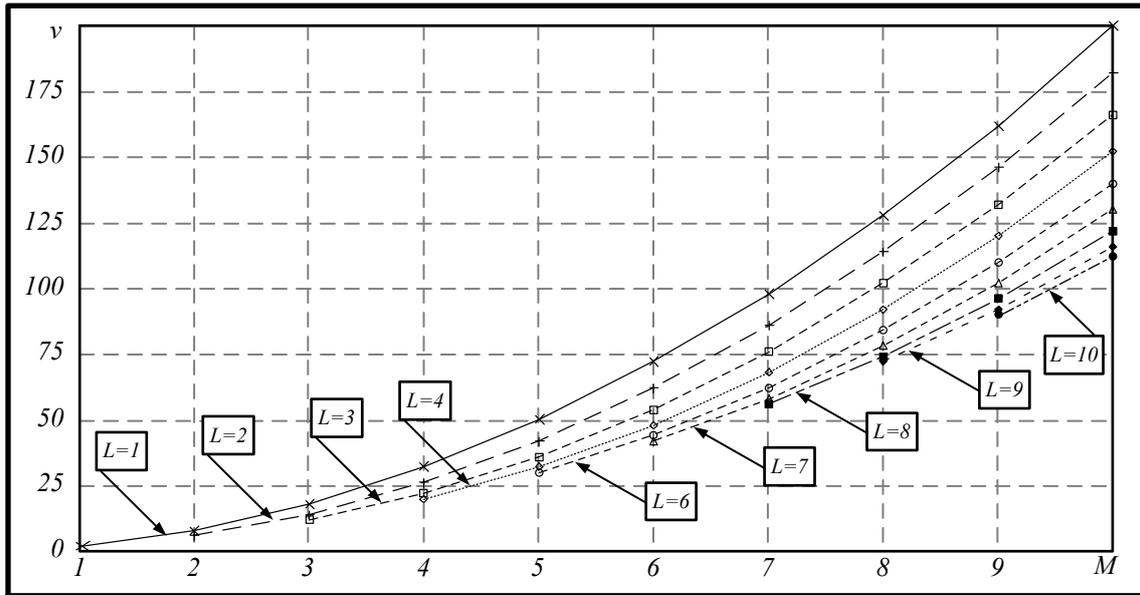


Рис. 3. Число отсекаемых коэффициентов ν при различных значениях M и L

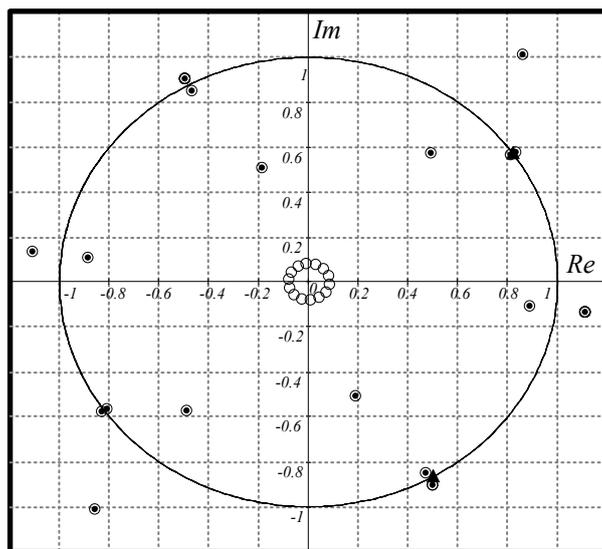


Рис. 4. Результат применения предлагаемого метода

Заключение. Предложен метод уменьшения вычислительных затрат при нахождении корней полинома, получаемого процессе применения алгоритма оценивания местоположения ИРИ USA-Root-Rare. Приведена формула расчёта числа отсекаемых корней. Показано, что применяя

данный метод, удаётся уменьшить степень полинома без потери значимых корней, соответствующих угловым положениям ИРИ. Уменьшение степени полинома приведет к уменьшению вычислительных затрат, связанных поиском его корней.

Литература:

1. Коробков, М.А. Корреляционные методы пеленгования источников излучения // Молодой ученый. — 2014. — № 13. — с. 55–58.
2. Коробков, М.А. Алгоритм USA — Root — Rare для задач пеленгования источников радиоизлучения однородной кольцевой антенной решёткой // Молодой ученый. — 2014. — № 13. — с. 47–54.
3. Коробков, М.А. Методы нахождения корней полинома в алгоритме пеленгования USA-Root-Rare в пакете Mathcad // Молодой ученый. — 2014. — № 14. — с. 54–56.

Влияние формофиксирующего аппрета на физико-механические свойства ткани

Куцевский Николай Александрович, кандидат технических наук, доцент;

Кошевка Юлия Владимировна кандидат технических наук, доцент

Хмельницкий национальный университет (Украина)

Одним из важных аспектов, определяющих качество при изготовлении одежды, является создание объемной формы из текстильного материала и устойчивое закрепление деформированной структуры ткани. Эффективным способом закрепления деформированной структуры ткани за счет получения внешних связей является соединение отформованного материала с термопластичными полимерными покрытиями, нанесенными на прокладочные ткани или непосредственно на изнаночную сторону текстильного материала.

Таким образом, актуальным является вопрос формозакрепления швейных изделий непосредственно во время образования формы без применения прокладочных материалов и повышенных температур, что позволяет уменьшить материалоемкость изделий, повысить эффективность труда и качество швейных изделий [1].

Так как целью работы является усовершенствование способа формования объемных форм деталей швейных изделий, которое заключается в возможности применения определенных клеевых веществ для фиксации полученных деформаций, поэтому на данном этапе важным является выбор материалов и клеевого вещества.

Критериями выбора материалов для исследования процесса формования является способ изготовления, вид переплетения его сырьевой состав, структурные и физико-механические характеристики. Выбрана ткань полотняного переплетения имеет стабильную структуру, высокую прочность и маленькое растяжение, что позволит выполнить условия одевание кривых поверхностей оболочками тканей. Установлено [1] что устойчивое формообразования достигается при изменении сетевого угла до 10° , и к такими тканями являются костюмные ткани.

Костюмные ткани разнообразны по физико-механическим свойствам, причем те что содержат примеси синтетических волокон имеют лучшие характеристики, они прочны, упруги и износостойкие [2].

В результате для исследования процесса формования было выбрано костюмную полушерстяную ткань арт. 2216 С полотняного переплетения, содержащей 70% шерсти и 30% примесей в виде вискозных волокон и волокон нитрона.

Не менее важным на данном этапе работы является выбор клеевого вещества.

Из большого количества клеев, которые относятся к синтетическим и природным полимерам, не так много есть растворимых в воде, что очень важно при выборе клеевого вещества для использования его в качестве жидко-активной рабочей среды (ЖАРС).

К растворимым в воде и безвредным для человека полимеров относят клеи на основе природных полимеров. Это растительные клеи на основе крахмала — модифицированный крахмал [2].

Для выполнения работы был избран модифицированный крахмал поскольку некоторые клеи использованы для формования деталей швейных изделия и в результате были выявлены некоторые недостатки, например, поливиниловый спирт и некоторые его модификации при использовании имеют неприятный запах, отслаиваются через некоторое время и т. д.

Нестандартность подхода к использованию модифицированного крахмала для формозакрепления и неизученность влияние последнего на физико-механические свойства ткани обуславливает необходимость определения этого влияния.

Для установления влияния модифицированного крахмала на физико-механические свойства текстильного материала было проведено исследование на двух концентрациях модифицированного крахмала 0,5 и 1%.

Методика нанесения модифицированного крахмала на ткань проста: образцы ткани, выкроенные по основе и по утку, погружаются в раствор определенной концентрации, которая соответствует условиям дальнейшего формования. Согласно [3] время погружения составил 10 с, далее производилась сушка пробы до полного удаления влаги в сушильном шкафу нагретого до температуры $80-110^\circ\text{C}$.

Таким образом было исследованы следующие физико-механические свойства ткани, согласно [3]: разрывная нагрузка, несминаемость, жесткость, гигроскопичность, и изменение веса образца.

В результате анализа влияния концентрации раствора модифицированного крахмала на физико-механические свойства ткани построено зависимости, представленные на рис. 1–4.

Абсолютная разрывная нагрузка с увеличением концентрации раствора возрастает на 6%. Это можно объяснить тем, что укрепляются связи между волокнами и нитями в тканях клеевым веществом.

Несминаемость текстильного материала уменьшается на 13%, соответственно растет его сминаемость, что может объясняться ростом жесткости, в силу наложения внешних связей, как на «тонкую» так и на «грубую» структуру материала.

Как видно из графика жесткость описывается полиномом второго порядка и с увеличением концентрации возрастает. Разницы по основе и утку не существует, потому что жесткость зависит от смачиваемости — способ-

		Концентрация, %		
		0	0,5	1
Абсолютная разрывная нагрузка, даН	Н.А.	72,0	75,1	76,06
	Н.у	60,7	61,3	63,4

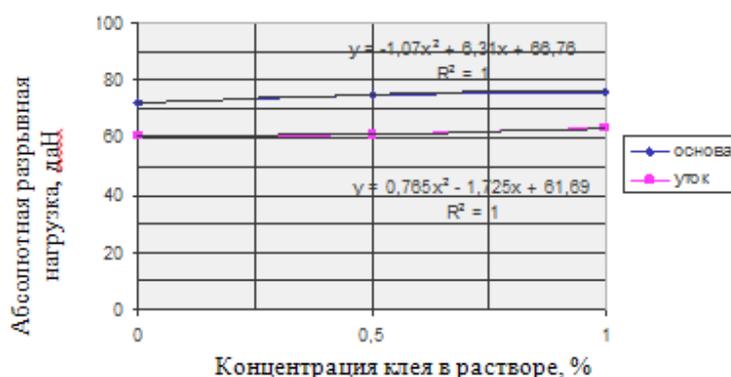


Рис. 1. Зависимость абсолютной разрывной нагрузки от концентрации клеевого вещества

		Концентрация, %		
		0	0,5	1
Несминаемость, %	Н.А.	77,7	76,4	68,3
	Н.В.	77,2	75,5	65,8

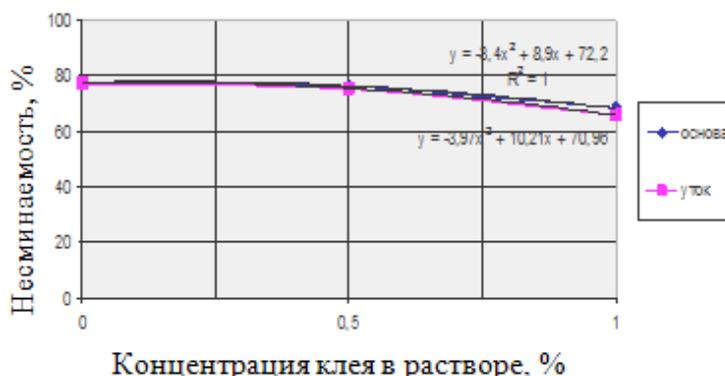


Рис. 2. Зависимость несминаемости от концентрации клеевого вещества

		Концентрация, %		
		0	0,5	1
Жесткость		1,51	1,53	1,58

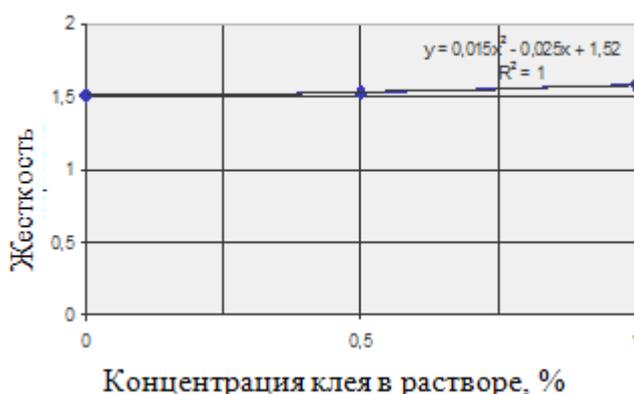


Рис. 3. Зависимость жесткости от концентрации клеевого вещества

ности ткани смачиваться раствором модифицированного крахмала, что в свою очередь зависит от гидрофобности ткани и коэффициента поверхностного натяжения. Значение жесткости является важным показателем качества одежды и характеризует уровень формоустойчивости.

Увеличение коэффициента жесткости объясняется увеличением массы образца материала и снижением

функции относительного прогиба, влияет на показатель коэффициента жесткости.

Анализ графической зависимости гигроскопичности материала от концентрации клеевого вещества показал, что при изменении концентрации от 0 до 0,5% показатели гигроскопичности снижаются на 14%. При увеличенные концентрации от 0,5 до 1% значения показателей растут.

		Концентрация, %		
		0	0,5	1
Масса, г	Н.А.	0,30	0,8	0,84
	Н.В.	0,28	0,88	0,93

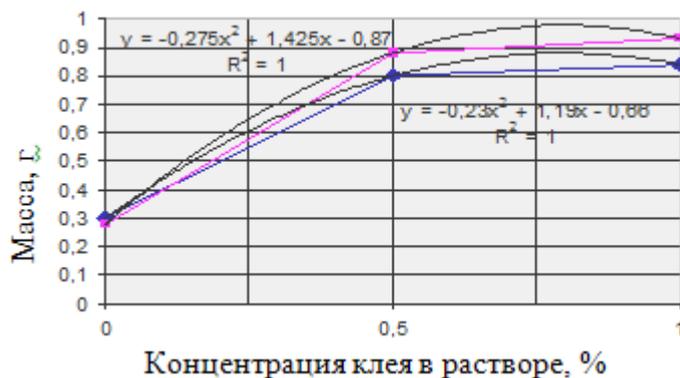


Рис. 4. Зависимость массы материала от концентрации клея в растворе

Гигроскопичность, %	Концентрация, %		
	0	0,5	1
	35,1	24,1	57,1

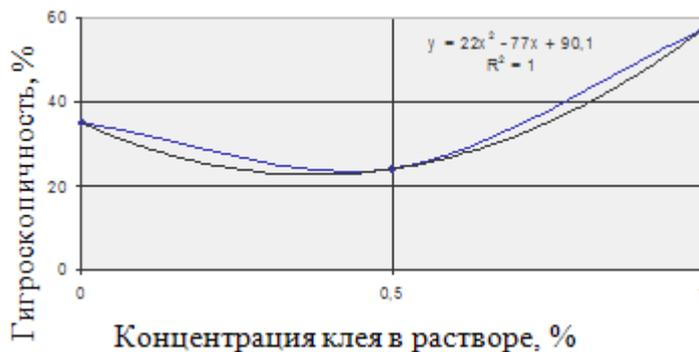


Рис. 5. Зависимость гигроскопичности материала от концентрации клея в растворе

Исследуемая ткань полушерстяная в связи с особенностями ее строения волокнистого содержания под действием влаги волокна вместе с клеевым веществом набухают поглощая эту влагу. С увеличением концентрации структура расположения макромолекул становится более ориентирована, что дает возможность большего попадания влаги.

Анализ результатов экспериментальных данных дает возможность определить зависимость между показателями физико-механических свойств и концентрацией модифицированного крахмала, которая выражается гра-

фически и математически описывается адекватными уравнениями, приведенными на рисунках.

Итак проанализировав графические зависимости можно сделать вывод, что с увеличением концентрации раствора модифицированного крахмала качество пробы будет возрастать, но следует отметить, что проба становится жесткой, поэтому раствором концентрацией 1% возможно обрабатывать детали, которые по конструкции являются жесткими. Для конструкций мягких форм необходимо применять растворы концентрацией 0,5%.

Литература:

1. Колотилова, Г. В. Химизация процессов формования с целью повышения качества швейных изделий // Известия вузов. – 1983. - № 2
2. А. П. Рогова, А. И. Табакова Изготовление одежды повышенной формоустойчивости. — М.: Легкая индустрия, 1979. – 184 с.
3. Буханцова, Л. В., Кушевський М. О. Формування об'ємно-просторової форми текстильних матеріалів в рідино-активному середовищі // Вісник Хмельницького національного університету. – 2005. - № 5. - с. 96–100.

Влияние вида вибрации на качество формования объемных деталей головных уборов

Кущевский Николай Александрович, кандидат технических наук, доцент;

Химич Галина Николаевна, аспирант
Хмельницкий национальный университет (Украина)

На сегодняшний день в гардеробе современной женщины большое внимание уделено головным уборам. Проблема обеспечения их высокого качества предусматривает решение вопросов усовершенствования конструкции и технологии изготовления, снижения расходов материалов, и улучшение эксплуатационных свойств. В последнее время к головным уборам выдвигают все более жесткие требования: минимальный уход и затраты на возобновление внешнего вида. Поэтому формируемые головные уборы должны удовлетворять эстетические вкусы разных возрастных групп населения, быть качественными, простыми в эксплуатации и разнообразными по форме.

Предыдущими исследованиями установлено, что применение способов формования объемных деталей головных уборов, которые обеспечивают активизацию работы «грубой» структуры материала способствует получению качественных образцов без складок, утолщений и заломов. Кроме того в работах [1, 2, 3] доказаны преимущества применения вместо традиционной паровоздушной смеси жидкостно-активной рабочей среды (ЖАРС). Последняя в процессе формования выполняет две функции: выступает пластификатором волокон и нитей ткани, уменьшая трение между ними, и обеспечивает равномерное приложение усилия в каждую точку образца ткани.

В работах [2, 3, 4] исследовано процесс формования объемных деталей головных уборов динамическим методом с использованием вертикальных вибрационных колебаний. Однако остается не исследованным влияние горизонтальной вибрации на качество отформованных объемных деталей головных уборов и на сам процесс формования.

Именно поэтому авторами исследовано качество объемных образцов ткани, отформованных в одинаковых условиях с применением отдельно горизонтальной и отдельно вертикальной вибраций. Рабочей средой при этом

выступает жидкость (вода). Управляемыми факторами процесса избрана амплитуда колебаний A , частота колебаний V и время формования t , которые изменяли в пределах от 1 мм до 5 мм, от 1 Гц до 9 Гц и от 30 с до 110 с соответственно. Формование объемных деталей головных уборов исполняли в масштабе 1:2. Высота формовочного элемента при этом составляла 40,5 мм. Для исследований избрана пальтовая шерстяная ткань арт. Соната с содержанием шерсти 78% и химических волокон 22%. Результаты исследований приведены в таблицах 1–3.

По результатам исследований (табл. 1–3) построены диаграммы, на которых изображены высоты образцов ткани, отформованных с помощью вертикальной и горизонтальной вибрации и разница между ними.

Из приведенных данных видно, что при изменении амплитуды вибрации наилучшего результата для формования с помощью горизонтальной вибрации достигают при значениях 2 мм, при значении 3 мм качество несколько снижается. Последующее увеличение амплитуды приводит к снижению высоты отформованных образцов, что обозначает ухудшение их качества. При формовании с помощью вертикальной вибрации наилучшего результата достигают при значениях 2, 3, и 4 мм. При изменении частоты и горизонтальной, и вертикальной вибрации наилучшего качества достигают при значении 5 Гц, последующее увеличение данного параметра до 9 Гц приводит к незначительному улучшению качества отформованных деталей. При этом использование горизонтальной вибрации позволяет получить образцы лучшего качества по сравнению с вертикальной при меньших значениях частоты вибрации. Так, например, высоту образца 37,0 мм достигают при частоте 3 Гц с использованием горизонтальной вибрации и 5 Гц с использованием вертикальной, а высоту образца 38,0 мм, которую достигают при использовании горизонтальной частоты 5 Гц, при формовании с помощью вертикальной вибрации не получают вообще. Увеличение времени формования для получения образцов

Таблица 1. Результаты исследований влияния амплитуды вибрации на высоту отформованных деталей

Значение A , мм	Горизонтальная вибрация				Вертикальная вибрация				Δh , мм
	h_{1r} , мм	h_{2r} , мм	h_{3r} , мм	$h_{срr}$, мм	h_{1v} , мм	h_{2v} , мм	h_{3v} , мм	$h_{срv}$, мм	
1	38,5	38,8	37,5	38,3	36,0	35,5	34,5	35,3	3,0
2	39,0	38,0	39,0	38,7	37,0	37,0	37,0	37,0	1,7
3	38,0	38,5	38,0	38,2	37,0	37,0	37,0	37,0	1,2
4	38,0	38,0	38,0	38,0	37,0	37,5	36,5	37,0	1,0
5	37,5	38,0	37,5	37,7	37,0	36,5	37,0	36,8	0,9

Таблица 2. Результаты исследований влияния частоты вибрации на высоту отформованных деталей

Значение V, Гц	Горизонтальная вибрация				Вертикальная вибрация				Δh, мм
	h ₁ , мм	h ₂ , мм	h ₃ , мм	h _{ср} , мм	h ₁ , мм	h ₂ , мм	h ₃ , мм	h _{ср} , мм	
1	33,0	34,0	32,0	33,0	32,0	30,0	31,0	31,0	2,0
3	37,0	37,0	37,0	37,0	36,0	36,0	36,0	36,0	1,0
5	38,0	38,5	37,5	38,0	37,0	37,0	37,0	37,0	1,0
7	38,5	38,0	38,0	38,2	37,0	37,0	37,5	37,2	1,0
9	39,0	38,0	38,0	38,3	37,5	37,5	37,0	37,3	1,0

Таблица 3. Результаты исследований влияния времени формирования на высоту отформованных деталей

Значение t, с	Горизонтальная вибрация				Вертикальная вибрация				Δh, мм
	h ₁ , мм	h ₂ , мм	h ₃ , мм	h _{ср} , мм	h ₁ , мм	h ₂ , мм	h ₃ , мм	h _{ср} , мм	
30	34,5	35,0	35,0	34,8	32,0	32,5	33,0	32,5	2,3
50	36,0	36,0	36,0	36,0	35,0	35,0	35,0	35,0	1,0
70	38,0	38,5	37,5	38,0	37,0	37,0	37,0	37,0	1,0
90	38,0	38,0	38,5	38,2	38,0	38,5	37,0	37,8	0,4
110	38,5	38,5	38,5	38,5	38,2	38,0	37,5	37,9	0,6

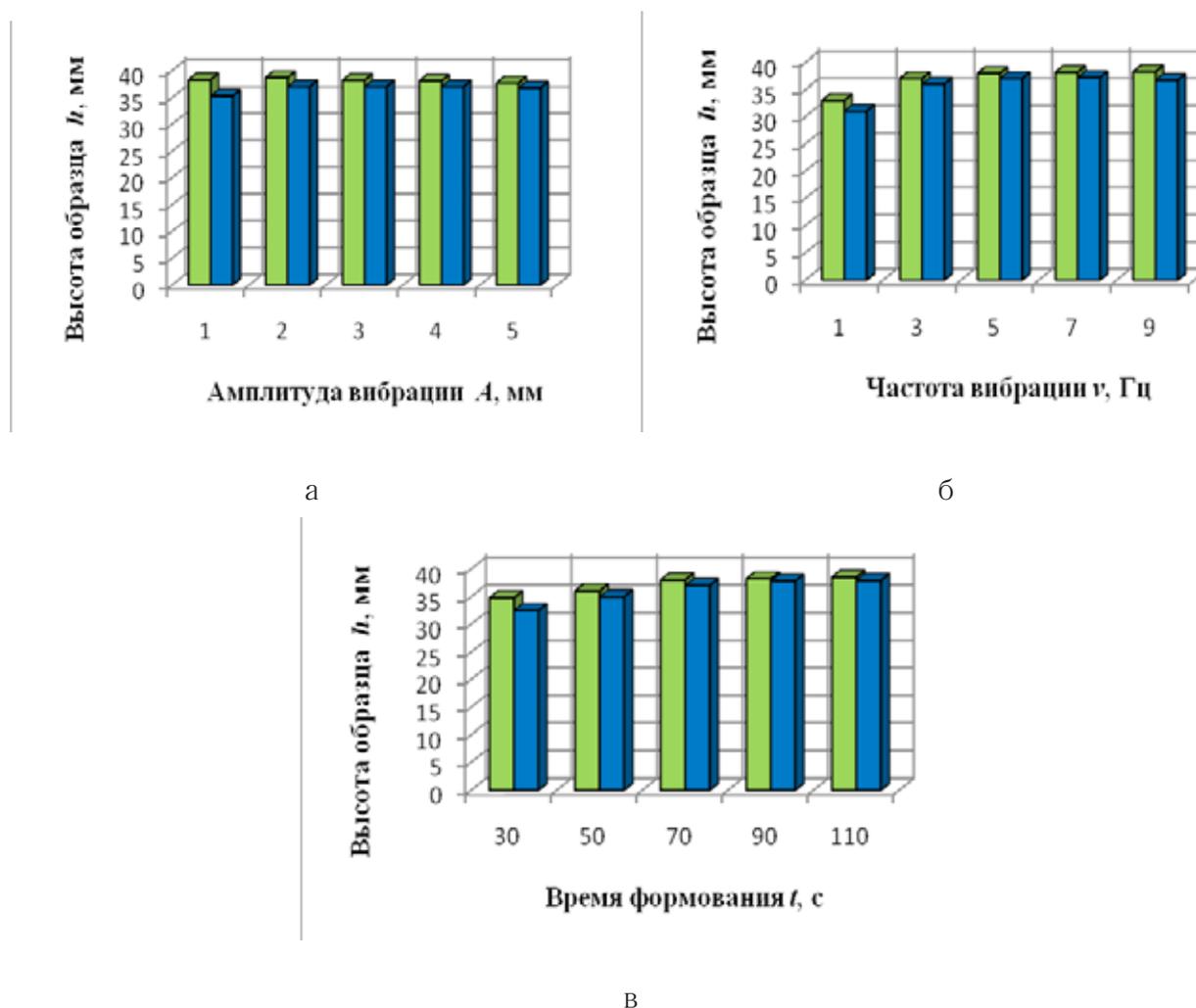


Рис. 1. Зависимость высоты отформованного образца от амплитуды вибрации (а); частоты вибрации (б) и времени формирования (в) для пальтовой ткани арт. Соната: — высота отформованного образца с помощью горизонтальной вибрации; — высота отформованного образца с помощью вертикальной вибрации.

с помощью горизонтальной и вертикальной вибрации способствует улучшению качества отформованных образцов. Изменение высот образцов при использовании горизонтальной и вертикальной вибрации имеет похожий характер: при увеличении длительности формирования до 70 с качество отформованных образцов стремительно растёт, последующее увеличение времени формования приводит к незначительному улучшению качества, однако значительно увеличивает энергозатраты. Необходимо отметить, что применение горизонтальной вибрации во всех случаях даёт лучший результат, чем вертикальной. Особая

разница ощутимая при малых значениях входных параметров. Очевидно это связано с тем, что горизонтальные колебания больше активизируют работу «грубой» сетчатой структуры материала, способствуя этим лучшему укладыванию ткани на формовочный элемент.

Анализ полученных данных показал, что при формировании пальтовой ткани арт. Соната применение горизонтальной вибрации позволяет получить образцы лучшего качества. Кроме того в отдельных случаях есть возможность снизить энергозатраты за счёт снижения значений входных параметров.

Литература:

1. Патент 68978 А України, ДОБF71/18. Спосіб формування об'ємних ділянок деталей одягу/Кушевський М. О. — № 20031110578; Заявлено 24.11.2003; Опубліковано 16.08.2004, Бюл. № 4.
2. Буханцова, Л. В. Удосконалення процесу формування жіночих головних уборів: дис... канд. техн. наук: 05.19.04/Буханцова Людмила Василівна. — Хмельницький, 2007. — 221 с.
3. Кошевка, Ю. В. Удосконалення процесу формування та закріплення форми деталей жіночих головних уборів із тканих матеріалів: дис... канд. техн. наук: 05.19.04/Кошевка Юлія Володимирівна. — Хмельницький, 2010. — 170 с.
4. Кушевський, Н. А. Разработка технологи формования одежды на основе вибрационного эффекта: дис... канд. техн. наук: 05.19.04/Кушевский Николай Александрович. — К., 1988. — 312 с.

О качестве и безопасности полуфабрикатов мясных рубленых

Рязанова Ксения Сергеевна, студент;

Ступникова Полина Борисовна, студент

Магнитогорский государственный технический университет имени Г. И. Носова (Челябинская обл.)

Гаврилова Евгения Владимировна, магистрант

Южно-Уральский государственный университет (научно исследовательский университет) (г. Челябинск)

В статье представлены требования, предъявляемые к качеству и безопасности полуфабрикатов мясных рубленых.

Ключевые слова: полуфабрикаты мясные рубленые, качество, Технический регламент Таможенного союза, требования.

Мясные рубленые полуфабрикаты — порционный продукт, изготавливаемый из измельченного мясного сырья с добавками. Производственный процесс производства и качество рубленых полуфабрикатов должно соответствовать требованиям, прописанным в техническом регламенте Таможенного союза «О безопасности мяса и мясной продукции», включающим в себя контроль за соблюдением:

- технологических процессов производства;
- правил ветеринарного осмотра убойных животных и ветеринарно-санитарной экспертизы мяса и мясных продуктов;
- ветеринарно-санитарных правил использования и переработки импортного мяса и мясopодуlктов на мясopеpаbатывaющих предприятиях России;

— санитарных правил для предприятий мясной промышленности, утвержденных в установленном порядке;

— гигиенических требований безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов, установленных нормативными правовыми актами Российской Федерации [1].

Данный технический регламент был принят в октябре 2013 года, до этого момента качество мяса и мясных продуктов регламентировалось государственными стандартами (ГОСТами), которые были обязательными для применения. При этом ГОСТы устанавливали обязательный определённый состав компонентов и их количественное содержание, что предопределяло сами продукты и гарантировало их качество, в том числе безопасность. Сейчас же технические регламенты, вместо требований

к качеству продукции, устанавливают лишь минимально необходимые требования, обеспечивающие биологическую, химическую и радиационную безопасность мяса и мясных продуктов.

Технический регламент Таможенного союза (ТР ТС) — документ, утвержденный Комиссией ТС, устанавливающий обязательные для применения и исполнения на таможенной территории ТС требования к продукции либо к продукции и связанным с требованиями к продукции процессам производства, монтажа, наладки, эксплуатации (использования), хранения, перевозки (транспортирования), реализации и утилизации [2, 3].

Целями разработки и принятия ТР ТС являются [2, 3]:

- обеспечение на таможенной территории ТС защиты жизни и (или) здоровья человека, имущества, окружающей среды, жизни и (или) здоровья животных и растений;

- предупреждение действий, вводящих в заблуждение потребителей;

- обеспечение энергетической эффективности и ресурсосбережения.

В качестве основы для разработки ТР ТС могут полностью или частично использоваться международные, региональные и национальные стандарты, а также национальные технические регламенты или их проекты [2, 3].

Требования, предъявляемые к рубленным полуфабрикатам из мяса:

1. Органолептические. На разрезе мясная часть рубленых полуфабрикатов должна иметь вид хорошо перемешанного фарша. Вкус и запах рубленых полуфабрикатов в сыром виде должны быть свойственными доброкачественному сырью, в жареном — свойственными жареному продукту [4, 5].

По органолептическим показателям в общем виде полуфабрикаты должны соответствовать требованиям, указанным в таблице 1.

1) Физико-химические. В рубленых полуфабрикатах регламентируют массовую долю влаги, жира, поваренной соли, а также массу одной порции [5, 6].

По физико-химическим показателям полуфабрикаты должны соответствовать требованиям, указанным в таблицах 2 и 3.

2) Показатели безопасности. При производстве рубленых полуфабрикатов из мяса, должны учитываться все возможные опасные факторы: превышение предельно допустимых норм содержание фармакологических веществ, химических загрязнителей, токсичных элементов, пестицидов, радионуклидов. Требования к данным факторам приведены в таблицах 4 и 5 [1, 7].

Таблица 1. Показатели органолептической оценки мясных полуфабрикатов

Наименование показателя	Характеристика
внешний вид и вид на срезе	форма, состояние поверхности на срезе, соответствующие данному наименованию полуфабриката, с учетом используемых рецептурных компонентов.
вкус и запах	свойственные данному наименованию полуфабриката с учетом используемых рецептурных компонентов.
цвет	свойственный цвету используемого в данном наименовании полуфабриката кускового или измельченного мясного сырья с учетом используемых рецептурных компонентов.

Таблица 2. Физико-химические показатели мясных полуфабрикатов

Наименование показателя	Норма для мясных полуфабрикатов				
	категории				
	А	Б	В	Г	Д
массовая доля белка, %, не менее	16	12	10	8	6
массовая доля жира, %, не более	18	35	50	Регламентируется в документе, в соответствии с которым полуфабрикаты изготовлены	
массовая доля крахмала, %, не более	2	3	4		
массовая доля хлорида натрия, %, не более	1,8				
массовая доля общего фосфора (P ₂ O ₅), %	Регламентируется в документе, в соответствии с которым полуфабрикаты изготовлены				
массовая доля хлеба, %	Регламентируется в документе, в соответствии с которым полуфабрикаты изготовлены				
массовая доля начинки или покрытия, %	Регламентируется в документе, в соответствии с которым полуфабрикаты изготовлены				
температура в толще полуфабриката, °С	Регламентируется в документе, в соответствии с которым полуфабрикаты изготовлены				

Таблица 3. Физико-химические показатели мясосодержащих полуфабрикатов

Наименование показателя	Норма для мясосодержащих полуфабрикатов		
	категории		
	В	Г	Д
массовая доля белка, %, не менее	9	7	5
массовая доля жира, %, не более	35	Регламентируется в документе, в соответствии с которым полуфабрикаты изготовлены	
массовая доля крахмала, %, не более	6		
массовая доля хлорида натрия, %, не более	1,8		
массовая доля общего фосфора (P2O5), %	Регламентируется в документе, в соответствии с которым полуфабрикаты изготовлены		
массовая доля хлеба, %	Регламентируется в документе, в соответствии с которым полуфабрикаты изготовлены		
массовая доля начинки или покрытия, %	Регламентируется в документе, в соответствии с которым полуфабрикаты изготовлены		
температура в толще полуфабриката, °С	Регламентируется в документе, в соответствии с которым полуфабрикаты изготовлены		

Таблица 4. Микробиологические показатели полуфабрикатов мясных рубленых в соответствии с требованиями ТР ТС 034/2013

КМАФАМ КОЕ/г, не более	Масса продукта (г), в котором не допускается		L. monocytogenes	Плесени, КОЕ/г, не более
	БГКП (количественные формы)	патогенные, в том числе сальмонеллы		
5 × 10 ⁶	0,0001	25	в 25 г не допускается	500

Таблица 5. Требования безопасности к полуфабрикатам мясным рубленым в соответствии с ТР ТС 021/2011

Показатели	Допустимые уровни, мг/кг, не более
токсичные элементы	
свинец	0,5
мышьяк	0,1
кадмий	0,05
ртуть	0,03
антибиотики	
левомицетин	не допускается (<0,01 мг/кг)
тетрациклиновая группа	не допускается (<0,01 мг/кг)
грисин	не допускается (<0,5 мг/кг)
бацитрацин	не допускается (<0,02 мг/кг)
пестициды	
гексахлорциклогексан (α, β, γ — изомеры)	0,1
ДДТ и его метаболиты	0,1
радионуклиды	
удельная активность цезия-137, Бк/кг (л)	200

Литература:

1. Технический регламент Таможенного союза 034/2013 «О безопасности мяса и мясной продукции»
2. Соглашение о единых принципах и правилах технического регулирования в Республике Беларусь, Республике Казахстан и Российской Федерации (ратифицировано Федеральным законом от 27.06.2011 № 152-ФЗ).

3. Вайскрובה, Е. С. Современные требования к пищевой продукции в рамках таможенного Союза/Е. С. Вайскрובה, А. Е. Кожемякина // Международный научно-исследовательский журнал. — 2014. — № 1–1 (20). — с. 59–62.
4. Гаврилова, Е. В. Органолептическая оценка полуфабрикатов мясных рубленых с растительными компонентами/Е. В. Гаврилова, К. А. Бажина // Молодой ученый. — 2013. — № 11. — с. 84–86.
5. Ребезов, М. Б. Технохимический контроль и управление качеством производства мяса и мясopодуктов/М. Б. Ребезов, Е. П. Мирошникова, О. В. Богатова, Н. Н. Максимюк, М. Ф. Хайруллин, А. А. Лукин, О. В. Зинина, Р. В. Залилов // Челябинск: ИЦ ЮУрГУ, — 2011. — с. 107.
6. Зинина, О. В. Определение качественных показателей полуфабрикатов мясных рубленых функциональной направленности/О. В. Зинина, Е. В. Гаврилова, К. С. Рязанова // Молодой ученый. — 2014. — № (67). — с. 179–182.
7. Технический регламент Таможенного союза 021/2011 «О безопасности пищевой продукции»

Формирование требований к двигателям силовых установок летательных аппаратов

Сенюшкин Николай Сергеевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник;
 Зырянов Алексей Викторович, кандидат технических наук, доцент;
 Султанов Рузиль Фаильевич, научный сотрудник;
 Салимова Ирина Ильинична, студент, лаборант
 Уфимский государственный авиационный технический университет

При разработке любого летательного аппарата (кроме планеров и ряда аппаратов легче воздуха) в независимости от его функционального назначения возникает потребность в таком двигателе для силовой установки, который может обеспечить соответствие изделия всем условиям технического задания заказчика. Это ставит перед ними задачу формирования и анализа списка требований к силовой установке. Грамотный, взвешенный подход при составлении списка позволит подобрать оптимальный двигатель для данного летательного средства и в итоге создать наиболее конкурентоспособный авиационный комплекс. При этом немаловажную роль играют задачи экономии, конкурентоспособности, национальной безопасности и импортозамещения. Для летательных аппаратов военного назначения использование иностранных двигателей и их компонентов недопустимо.

Требования, предъявляемые ко всем авиационным двигателям условно можно разделить на два крупных блока: общие технические требования и технические требования к конкретному типу двигателю, устанавливаемому на конкретный тип летательного аппарата.

Общие требования можно разделить на: технические, специальные, производственные (технологические) и эксплуатационные.

Основными **техническими** требованиями, характеризуют выполнение технического задания в части реализации потребностей летательного аппарата в обеспечение

его летно-технических и эксплуатационных характеристик:

- обеспечение взлетной тяги согласно тактико-техническим характеристикам летательного аппарата на протяжении всего ресурса;
 - обеспечение надежной работы силовой установки и стабильности полетных режимов;
 - обеспечение минимального расхода топлива;
 - хорошая приемистость;
 - обеспечение заданных рабочих режимов на всем типом профилей полета;
 - обеспечение безопасности эксплуатации;
 - обеспечение минимально допустимых выбросов загрязняющих веществ в атмосферу (для военных самолетов не актуально);
 - минимальные стоимость, масса и габариты при заданной тяге.
- К специальным требованиям относятся:
- низкая ИК заметность с задней полусферы;
 - низкая шумность;
 - низкая радиолокационная заметность с передней полусферы;
 - устойчивость к боевым повреждениям;
 - возможность работать на разных сортах топлива, в том числе низкого качества;
 - работа двигателя с отказавшими масло- или электросистемой.

К **производственным** (технологическим) требованиям относятся:

- простота и технологичность изготовления и сборки двигателя;
 - минимальные требования к производственному и испытательному оборудованию, а также к персоналу.
 - высокая степень стандартизации и унификации элементов;
 - использование недефицитных и дешевых материалов;
 - низкая стоимость изготовления двигателя в целом.
- К эксплуатационным требованиям относятся:
- удобство замены сменных эксплуатационных элементов (фильтры, стопоры и т. д.)
 - удобство монтажа и демонтажа на летательный аппарат (с учетом изделия);
 - простота, удобство выполнения регламентных операций;
 - низкая стоимость ремонта и доступность запасных частей.

Часть из перечисленных требований являются взаимно противоречащими друг другу. Поэтому при создании двигателя приходится в той или иной степени идти на компромиссные решения, выполняя в первую очередь требования, которые для данного двигателя являются главными. Необходим поиск оптимума для каждого конкретного случая. Например, для истребителя важнее максимальная тяга и минимальная масса, а для транспортного самолета удельный расход топлива, который за длительный перелет за счет экономии горючего покрывает рост массы силовой установки.

Технические требования к конкретному типу двигателя с учетом его компоновки в составе конкретного типа летательного аппарата и определяют важность соответствия изделия требованиям технического задания. При составлении ТЗ учитывается назначение и условия эксплуатации двигателя на летательном аппарате. Количественные показатели основных данных в совокупности должны обеспечивать приоритетность комплексу «летательный аппарат — двигатель» по отношению к лучшим известным и создаваемым образцам.

В техническом задании прописываются конкретные значения некоторых параметров. Параметры, характеризующие ГТД, можно разделить на две группы.

Первая группа — удельные параметры, не зависящие от размерности двигателя, используемые для сравнительной оценки технического совершенства ГТД: удельная тяга, удельный расход топлива, удельная масса, лобовая тяга. При проектировании, даже если это не оговорено в техническом задании, необходимо обеспечить конкурентоспособный продукт, с удельными параметрами не хуже чем у существующих или проектируемых аналогов.

Вторая — это параметры, выражающиеся абсолютной величиной и зависящие от размерности двигателя. Важнейшие из них: тяга, габариты, сухая масса двигателя.

Рассмотрим некоторые параметры по подробнее. При установке двигателя на определенный существующий летательный аппарат, расход воздуха через двигатель ограничивается пропускной способностью воздухозаборника данного летательного аппарата (с явлениями зуда и помпажа). Способ повышения удельной тяги в данном случае — увеличение тяги путем интенсификации параметров рабочего цикла, к сожалению, иногда ценой ресурса и стоимости двигателя. Высокая удельная тяга для современных двигателей для боевой авиации позволяет обеспечивать сверхзвуковой полет без включения форсажной камеры — одно из важнейших требований к истребительным комплексам пятого поколения

Удельная тяга гражданских ТРДД имеет тенденцию к некоторому снижению. Это является следствием постоянного повышения степени двухконтурности для улучшения экономичности.

Удельный расход топлива характеризует топливную эффективность авиационного двигателя. Для двигателей гражданской авиации значения удельного расхода воздуха при определенной тяге на крейсерском и на взлетном режимах обязательно прописываются в техническом задании на проектирование. Снижение удельного расхода топлива значительно уменьшает прямые эксплуатационные расходы и позволяет увеличить дальность полета воздушных судов. Поэтому улучшение экономичности гражданских ТРДД, ТВД и вертолетных ГТД — важнейшее направление их совершенствования. Увеличение двухконтурности и степени повышения давления наиболее частые пути уменьшения удельного расхода топлива для гражданской авиации.

Удельная масса является комплексным показателем, который характеризует параметрическое, конструктивное и технологическое совершенство любого двигателя.

К основным из этих способов снижения массы можно отнести:

- повышение параметров цикла, снижение потерь, применение сложных циклов позволяет увеличить удельную работу цикла и, при заданной тяге, снизить потребный расход воздуха через ГТД, а значит и его размерность;
- увеличение аэродинамической нагрузки на компрессор, а также конструктивные и схемные мероприятия позволяют снизить число ступеней и, следовательно, снизить массу;
- применение композиционных и перспективных материалов с низкой плотностью позволяет снизить массу;
- применение перспективных технологий изготовления: моноколеса типа «blisk» и «bling», передовые методы сварки роторов и корпусов;

При фиксированном диаметре на входе в компрессор лобовую тягу можно повысить за счет увеличения удельной тяги или производительности компрессора.

Требование к габаритным размерам двигателя связано с обеспечением его установки на самолете и возможностью его обслуживания и ремонта. Габаритный диаметр

двигателя является весьма важной характеристикой, так как влияет на размеры гондолы двигателя, а следовательно, на ее лобовое сопротивление и массу. Малая длина двигателя также является важным показателем его качества, так как способствует уменьшению объема двигателя и повышению полезного объема на самолете при размещении двигателя.

Реализация требования к габаритным размерам осуществляется путем разработки конструкции с учетом этого требования и выпуском согласованного с разработчиком самолета, габаритного чертежа, в котором, наряду с максимальным диаметром и длиной, указаны, например, контуры расположения агрегатов, узлы крепления двигателя.

Тяга (мощность) авиационного двигателя должна обеспечивать необходимую тяговооруженность летательного аппарата в различных этапах полета в любой точке типового профиля. Величина тяги двигателя должна быть достаточной для обеспечения необходимых условий полета при заданных климатических условиях на протяжении всего ресурса. При проектировании нового изделия увеличение тяги до необходимого уровня достигается интенсификацией параметров рабочего цикла — увеличение температуры газа, увеличение расхода воздуха, уменьшение степени двухконтурности, дожиганием топлива в форсажной камере сгорания.

Общая масса двигателя складывается из суммы масс отдельных узлов и деталей. Значения массы двигателя, его узлов и деталей входят в конструкторскую документацию и контролируются в процессе изготовления, сборки и отгрузки потребителю.

Снижение массы двигателя, а следовательно, и удельной массы при заданной тяге достигается несколькими путями. Один из них — выбор рациональной конструктивной схемы двигателя и его основных узлов. Другим путем снижения массы двигателя является повышение качества применяемых конструкционных материалов с большой величиной удельной прочности,

характеризующей отношение предела прочности материала к его плотности. Широкое применение в двигателестроении нашли легкие алюминиевые и магниевые, а также титановые сплавы. И следующий путь — это рациональное с точки зрения уменьшения массы конструирование всех входящих в двигатель деталей и их элементов.

Надежность является комплексным свойством двигателя, включающим в себя долговечность, сохраняемость, безотказность и ремонтпригодность двигателя. Уровень надежности двигателя характеризуется количественными показателями, определяемыми на основании статистических данных и расчетов, он закладывается при проектировании двигателя и контролируется в процессе всего его существования.

Обеспечение надежной работы двигателя достигается: закладкой в конструкцию отработанных и доведенных решений; учет при компоновки двигателя удобства сборки-разборки и обслуживания в целом; дублирование наиболее важных систем и узлов; контролем за качеством материалов, изготовления, сборки и испытаний двигателя, а так же его узлов; соблюдение всех правил эксплуатации и своевременный контроль за состоянием двигателя.

При выборе двигателя для проектируемого ЛА необходимо рассмотреть технические требования, учитывающие опыт применения всех типов ГТД, и специфические требования, учитывающие его установку на определенный тип летательного аппарата. Перечень специфических требований к ГТД, к которым можно отнести нормальную работу на малом газе в условиях ливневых осадков или при отрицательных и положительных перегрузках, возможность быстрого выхода на максимальный режим формируются на основе анализа условий эксплуатации и назначения летательного аппарата.

Выбор определенных качеств или характеристик силовой установки для проектируемого летательного аппарата предопределяет уровень основных параметров его рабочего цикла и конструктивный облик.

Литература:

1. Газотурбинные двигатели./А. А. Иноземцев, В. Л. Сандрацкий. Пермь: ОАО «Авиадвигатель», 2006.
2. Конструкция и проектирование авиационных газотурбинных двигателей/С. А. Вьюнов, Ю. И. Гусев, А. В. Карпов. — М.: Машиностроение, 1989 г.
3. Конструктивно-компоновочные схемы авиационных ГТД./М. Л. Кузьменко, В. С. Чигрин, С. Е. Белова. — г. Рыбинск: РГАТА, 2005 г.

Исследование работы железобетонных балок с пролетом среза $a/h_0=0,5$

Снежкина Ольга Викторовна, кандидат технических наук, доцент;

Киселев Артем Анатольевич, аспирант;

Ладин Роман Акбарович, аспирант

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

С целью получения более полной информации о напряженно-деформированном состоянии коротких железобетонных балок с пролетом среза $a/h_0=0,5$ проведены натурные экспериментальные исследования и выполнен расчет указанных конструкций численным методом конечных элементов по программе «ЛИРА».

Натурные экспериментальные исследования. Опытные образцы коротких балок проектировались прямоугольного сечения с размерами 25x40 см. Бетон принимался класса В 25, продольная арматура класса А III ($\mu_s=0,85\%$).

Схема и общий вид установки для испытаний показаны на рис. 1. Нагружение балок производилось гидравлическим домкратом ДГ-200 через систему распределительных траверс поэтапно: по 2000 кг до образования исследуемых трещин и далее, до разрушения, по 5000 кг. Схема нагружения показана на рис. 1. Определение ширины раскрытия трещин в бетоне производилась с использованием трубки Брюнелля.

По результатам испытаний произведена классификация трещин, определены разрушающие усилия, а также усилия при образовании и развитии трещин.

Выявлено четыре вида характерных трещин: наклонные трещины Т–Г, выделяющие сжатую полосу бе-

тона, вертикальные трещины Т–Р в бетоне растянутой зоны, серия наклонных прерывистых трещин, характерных при раздавливании бетона и наклонные трещины Т–О, расположенные внутри сжатой наклонной полосы.

Опытные образцы коротких железобетонных балок имели следующий характер трещинообразования: одновременно с наклонной Т–Г (при нагрузке 0,7 от разрушающей) образовалась вертикальная трещина Т–Р. В дальнейшем трещина Т–Р практически не развивается, и длина ее к моменту разрушения образца составляет 0,25 общей высоты балки. Наклонная трещина Т–О образуется в средней части балки, в зоне бетона, находящейся между грузовой и опорными площадками (в момент образования $a_{ср} = 0,05$ мм). При дальнейшем росте нагрузки трещина интенсивно развивается к центрам приложения сил, перерастая в серию разветвленных трещин. К моменту разрушения появляются характерные трещины, выделяющие сжатую зону бетона, как с внешней, так и с внутренней стороны (рис. 2).

По результатам экспериментальных исследований коротких железобетонных балок с пролетом среза $a/h_0=0,5$ поверхность бетона можно разделить на четыре характерные зоны. Первая зона представляет собой наклонную полосу, расположенную между грузовой

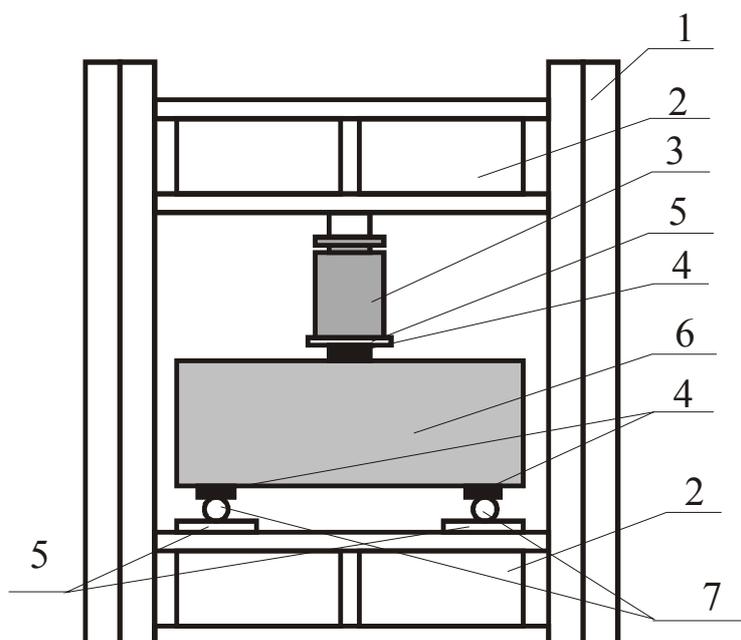


Рис. 1. Схема силовой установки испытания образцов-балок: 1 — металлическая рама; 2 — распределительная траверса; 3 — гидродомкрат; 4 — опорные площадки; 5 — жесткий штамп; 6 — испытываемый образец; 7 — катки

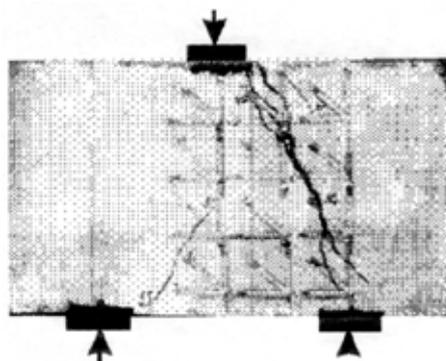


Рис. 2. Фотография опытного образца балки с $a/h_0=0,5$

и опорной площадками, в пределах которой концентрируются главные сжимающие напряжения. Вторая зона представляет собой горизонтальный участок в нижней части балки, в пределах которого концентрируются главные растягивающие напряжения. Третья и четвертая зоны располагаются с внутренней и с внешней стороны сжатого наклонного участка бетона и характеризуются малыми напряжениями [1,2,3].

Численные исследования. Одновременно с натурным экспериментом выполнен расчет указанных конструкций

с помощью ППП АП ЖБК. Расчетная схема балок представляет собой множество конечных элементов в виде прямоугольных ячеек размером $2,5 \times 2,5$ и шириной 25 см. По причине ограничения количества элементов в расчете задействована лишь половина балки. Действие отброшенной части заменялось наложением горизонтальных связей. Принятая расчетная схема допустима, так как обе части балки работают симметрично относительно линии действия внешней силы. Опорные площадки имитировались приложением вертикальных связей в узлы, соот-

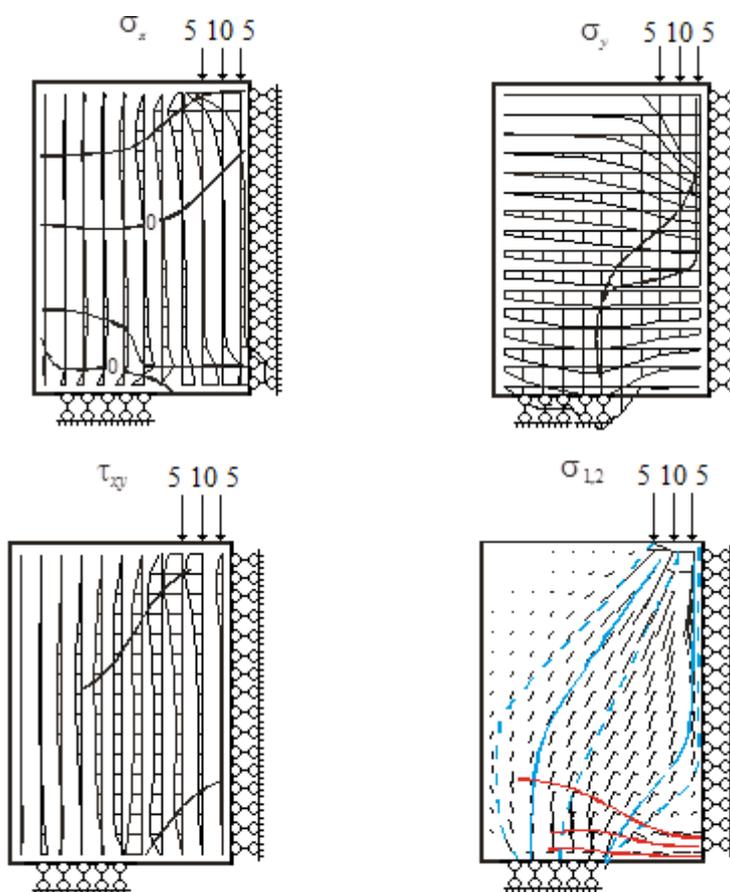


Рис. 3. Эпюры напряжений в балке с $a/h_0=0,5$

ветствующие расчетной модели. Нагружение сосредоточенной силой, действующей на балку, моделировалось распределенной нагрузкой, приложенной в узлы конечных элементов по ширине грузовой площадки.

По результатам расчета определены величина и характер распределения: нормальных напряжений — σ_x ; σ_y ; касательных напряжений — τ_{xy} и главных напряжений — σ_1 ; σ_2 .

Распределение нормальных напряжений σ_x : максимальные сжимающие напряжения σ_x располагаются в верхней части балки, максимальные растягивающие напряжения — в нижней части эпюры у нижней грани балки (рис. 3). Характерным в распределении нормальных напряжений является то, что в пролете среза эпюры σ_x являются двузначными.

Распределение нормальных напряжений σ_y : максимальные напряжения σ_y располагаются в вертикальном сечении по линии действия нагрузки, при этом, с уда-

лением от верхней и нижней грани, то есть с удалением от линии действия нагрузки, величина действия максимальных напряжений уменьшается. Одновременно происходит увеличение длины эпюр σ_y в направлении оси X (рис. 3 на стр. 103).

Распределение касательных напряжений τ_{xy} : эпюры имеют максимальные значения в верхней части вертикальных сечений, расположенных ближе к центру передачи нагрузки, и в нижней части в сечениях, расположенных ближе к центру действия реакции (рис. 3).

Распределение главных сжимающих и главных растягивающих напряжений: главные сжимающие напряжения концентрируются между верхней гранью опоры, между осями действия внешней и реактивной нагрузки; главные растягивающие напряжения концентрируются у нижней грани балки, при этом траектория максимальных растягивающих напряжений отклоняется вглубь балки к зоне действия реактивных сил [4,5].

Литература:

1. Ладин, Р.А. Характер трещинообразования коротких железобетонных балок при разрушении по сжатой зоне/Р.А. Ладин, О.В. Снежкина, М.В. Кочеткова // «Молодой учёный». № 4 (63), 2014 С. 210–214
2. Баранова, Т.И. Гармонизация методов расчета железобетонных балок с различным пролетом среза/Т.И. Баранова, О.В. Снежкина // Вестник Отделения строительных наук РААСН, — 1998. — №2. — с. 41–45 с.
3. Скачков, Ю.П. Особенности напряженно-деформированного состояния коротких железобетонных элементов/Ю.П. Скачков, О.В. Снежкина, М.В. Кочеткова, А.В. Корнюхин // Молодой ученый. — № 12 (59). — 2013. — с. 172–175.
4. Шеин, А.И. Численные исследования работы железобетонных балок/Шеин А.И., Снежкина О.В., Ладин Р.А., Киселев А.А. // Современные проблемы науки и образования. — 2014. — №4; URL: www.science-education.ru/118-13853
5. Ладин, Р.А. Исследование работы коротких железобетонных балок на основе ППП АП ЖБК/Р.А. Ладин, А.А. Киселев // Вестник магистратуры. — №6 (33). — 2014. с. 96–98.

Контроль отказа автоматического повторного включения головного выключателя линии, питающей трансформаторную подстанцию, при самоустранившемся двухфазном коротком замыкании

Суров Леонид Дмитриевич, кандидат технических наук, доцент;
 Филиппов Вадим Владимирович, кандидат технических наук, доцент;
 Махиянова Наталья Витальевна, старший преподаватель
 Орловский государственный аграрный университет

Описан способ контроля отказа автоматического повторного включения головного выключателя линии, питающей трансформаторную подстанцию при самоустранившемся двухфазном коротком замыкании, разработана структурная схема и описана ее работа с изображением выходных сигналов.

Ключевые слова: короткое замыкание, автоматическое повторное включение, датчик напряжения, регистрирующее устройство, приемник зондирующих импульсов.

Control failure Autoreclosing head switch line supplying the transformer substation AT withdrew phase faults

L. D. Surov, V. V. Filippov, N. V. Mahiyanova

Describes a method of control failure automatic reclosing head switch the line supplying the transformer substation at withdrew a two-phase short-circuit, a block diagram is developed and described her work with the image of the output signals.

Keywords: short circuit, automatic reclosing, partitioned switch, a recording device, the sensor determine the type of short circuit.

Исчезновение напряжения на трансформаторной подстанции возможно по разным причинам. Это может быть плановое отключение, о нем известно, и такая ситуация не вызывает вопросов. Однако может быть аварийная ситуация, когда в питающей линии возникло устойчивое короткое замыкание (КЗ). При этом срабатывает защита, линия отключится, через время выдержки автоматического повторного включения (АПВ) (при наличии устройств в АПВ) линия снова включится и через время выдержки с ускорением снова отключится. В случае неустойчивого КЗ, которое за время бестоковой паузы самоустранился, при повторном включении линия останется в работе. Однако в случае отказа АПВ головного выключателя (ГВ) и самоустранившемся КЗ напряжение на линию не будет подано. Такую ситуацию можно расценивать, как отключение линии при устойчивом КЗ. Для правильной оценки ситуации, о причине исчезновения напряжения на подстанции, разработан способ [1].

Суть способа заключается в том, что с момента исчезновения одного из линейных напряжений на шинах трансформатора начинают первый отсчет времени, равный времени выдержки срабатывания защиты ГВ, при этом контролируют момент исчезновения двух других линейных напряжений и, если в момент окончания первого отсчета времени два других линейных напряжения исчезнут, то делают вывод об отключении ГВ,

с момента окончания первого отсчета времени начинают второй отсчет времени, равный времени выдержки АПВ плюс времени выдержки срабатывания защиты с ускорением ГВ и времени выдержки срабатывания защиты с ускорением, а также во все провода линии посылают зондирующие импульсы и измеряют время их прохождения до точек отражения, вычисляют расстояния до этих точек, сравнивают их между собой и с расстоянием до места установки ГВ и, если вычисленные расстояния равны друг другу и равны расстоянию до места установки ГВ и в момент окончания второго отсчета времени все три линейных напряжения на шинах трансформатора не появились, то делают вывод о самоустранившемся двухфазном КЗ и отказе АПВ ГВ линии, питающей трансформаторную подстанцию.

Разработанный способ поясняется рисунками, где: на рис. 1 представлена структурная схема, содержащая элементы для реализации способа;

на рис. 2 — диаграммы сигналов на выходах элементов, показанных на рис. 1, при успешном АПВ головного выключателя 1 при самоустранившемся КЗ в точке 2 (см. рис. 1).

Схема (см. рис. 1) содержит: головной выключатель 1, точку КЗ 2, трансформатор силовой 3, вводной выключатель шин подстанции 4, линии 5, 6, 7 и 8, отходящие от шин подстанции, датчик напряжения (ДН) 9, элемент

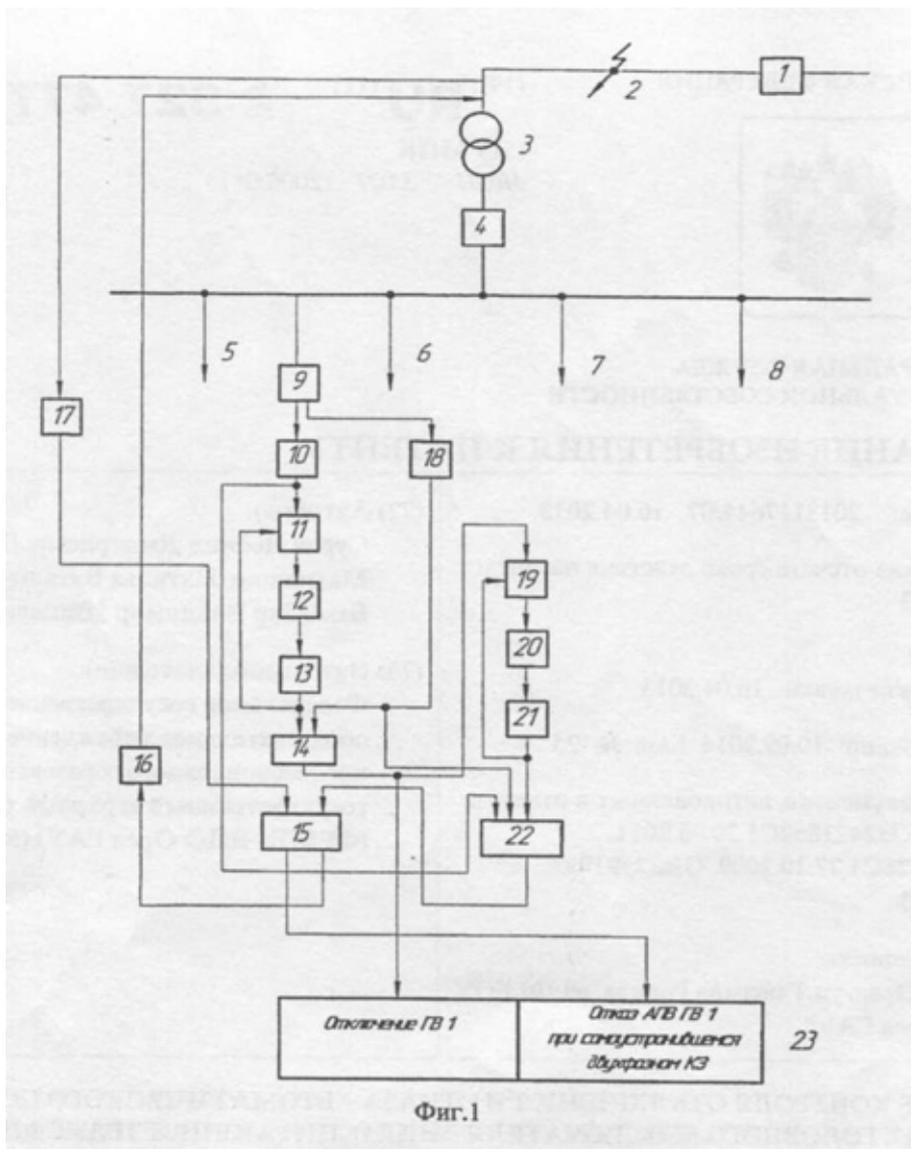


Рис. 1. Упрощенная схема трансформаторной подстанции, содержащая элементы для реализации способа

НЕ 10, элемент ПАМЯТЬ 11, элемент ЗАДЕРЖКА 12, элемент ОДНОВИБРАТОР 13, элемент И 14, блок обработки информации (БОИ) 15, генератор зондирующих импульсов (ГЗИ) 16, приемник зондирующих импульсов (ПЗИ) 17, элемент НЕ 18, элемент ПАМЯТЬ 19, элемент ЗАДЕРЖКА 20, элемент ОДНОВИБРАТОР 21, элемент И 22, регистрирующее устройство (РУ) 23.

Диаграммы сигналов на выходах элементов, показанных на рис. 1, при отказе АПВ ЕВ 1 при самоустранившемся двухфазном КЗ в точке 2, имеют вид (см. рис. 2): 24 — на выходе элемента 9; 25 — на выходе элемента 10; 26 — на выходе элемента И; 27 — на выходе элемента 12; 28 — на выходе элемента 13; 29 — на выходе элемента 14; 30 — на выходе элемента 15; 31 — на выходе элемента 16; 32 — на выходе элемента 17; 33 — на выходе элемента 18, 34 — на выходе элемента 19; 35 — на выходе элемента 20; 36 — на выходе элемента 21; 37 — на выходе элемента 22; 38 — в РУ 23.

На рис. 2 также показаны: t_1 — момент времени исчезновения одного из линейных напряжений, t_2 — момент окончания времени выдержки срабатывания защиты ЕВ 1, t_3 — момент окончания времени выдержки АПВ плюс времени выдержки срабатывания защиты с ускорением ЕВ 1.

Способ осуществляется следующим образом.

В нормальном режиме работы сети на выходе ДН 9 есть два сигнала (рис. 2, диагр. 24), поэтому на выходах элементов НЕ 10 и 18 сигналов нет (рис. 2, диагр. 25 и 33). Схема находится в режиме контроля.

При исчезновении одного из линейных напряжений на шинах трансформатора, вызванного двухфазным КЗ, на первом выходе ДН 9 сигнал исчезнет (рис. 2, диагр. 24, момент времени t_1), при этом на выходе элемента НЕ 10 появится сигнал (рис. 2, диагр. 25). Этот сигнал поступит на вход элемента ПАМЯТЬ 11, запомнится им (рис. 2, диагр. 26) и поступит на вход элемента ЗАДЕРЖКА 12. С выхода этого элемента сигнал появится через время

и сравнит эти расстояния друг с другом и с расстоянием до ГВ 1. И, если все вычисленные расстояния будут равны друг другу и равны расстоянию до ГВ 1, то на выходе БОИ 15 появится сигнал (рис. 2, диагр. 30), который поступит в РУ 23 и обеспечит появление в нем информации об отказе АПВ ГВ 1 при самоустранившемся двухфазном КЗ.

Таким образом, своевременное и однозначное получение информации о причине исчезновения напряжения на трансформаторной подстанции способствует повышению надежности электроснабжения потребителей, за счет снижения экономической потери из-за недоотпуска электрической энергии.

Литература:

1. Патент РФ №2527477, опубл. 10.09.2014, бюл.№25.

Способ контроля отказа отключения головного и отключения секционного выключателей при работе кольцевой сети в режиме подстанционного резервирования с определением вида короткого замыкания

Суров Леонид Дмитриевич, кандидат технических наук, доцент;
Филиппов Вадим Владимирович, кандидат технических наук, доцент
Орловский государственный аграрный университет

Описан способ контроля отказа отключения головного и отключения секционного выключателей при работе кольцевой сети в режиме подстанционного резервирования с определением вида короткого замыкания, разработана структурная схема и описана ее работа с изображением выходных сигналов.

Ключевые слова: короткое замыкание, автоматическое повторное включение, секционирующий выключатель, регистрирующее устройство, датчик определения вида короткого замыкания.

Process control failure stop brain and stop section switch at work ring network in substation booking a certain kind short circuit

L. D. Surov,
V. V. Filippov

Describes a method of control failure off the head and section switches off when using a ring network in the substation backup with a certain kind of short-circuit, a block diagram is developed and described her work with the image of the output signals.

Keywords: short circuit, automatic reclosing, partitioned switch, a recording device, the sensor determine the form of short замыкания.

Районные двухтрансформаторные подстанции, трансформаторы которых питаются от разных линий электропередач, с целью повышения надежности электроснабжения, выполняют с двумя секциями шин, которые соединены секционным выключателем (СВ). В нормальном режиме работы СВ отключен. Однако, в случае необходимости, например, при плановых или аварийных отключениях одного из трансформаторов, СВ включается и питание отключенной секции шин осуществляется от второго трансформатора. Протяженные, секционированные линии электропередач, питающиеся от разных секций шин подстанции, по возможности, соединяются сетевым пунктом автоматического включения резерва

(АВР), выключатель которого в нормальном режиме работы отключен. При этом образуется условно замкнутое кольцо в котором при возникновении устойчивого короткого замыкания (КЗ) на отдельном участке линии его можно локализовать, а на не поврежденный подать напряжение. Такая ситуация может быть при возникновении устойчивого КЗ в точке 4 (рис. 1). При этом должны отключиться головной выключатель (ГВ) 3 и секционирующий выключатель 5. Это приведет к исчезновению напряжения на пункте АВР со стороны поврежденной линии и выключатель 6 включится и обеспечит питание неповрежденного участка линии. И произойдет это при правильном действии средств автоматизации. Однако при от-

казе отключения ГВ 3, что может произойти по причине какой-либо неисправности, произойдут отключения выключателей 9 и 5 и включение выключателей 6. При этом как и при правильном действии средств автоматики неповрежденный участок линии получит питание, но информация, об отказе отключения ГВ 3 и отключении СВ 9, обслуживающему персоналу будет неизвестно. Поэтому для своевременного получения информации при таком действии средств автоматики разработан способ [1].

Согласно этого способа для контроля отказа отключения головного и отключения секционного выключателей с момента появления тока КЗ в линии основного источника питания начинают отсчитывать время, равное времени отключения секционного выключателя (СВ) шин, при этом определяют вид короткого замыкания, контролируют момент исчезновения тока КЗ, и если два линейных напряжения исчезли в момент появления тока КЗ, линейное напряжение и ток КЗ исчезли в момент окончания отсчета времени, то делают вывод об отказе отключения ГВ и отключении СВ при двухфазном КЗ, а если в момент времени окончания отсчета времени исчезли все линейные напряжения и ток КЗ, то делают вывод об отказе отключения ГВ и отключении СВ при трехфазном КЗ.

Суть предлагаемого способа поясняется рисунками, где:

на рис. 1 — представлена структурная схема, содержащая элементы для реализации способа;

на рис. 2 — диаграммы сигналов на выходах элементов, показанных на рисунке 1 при устойчивом КЗ в точке 4 (см. рис. 1).

Схема (см. рис. 1) содержит: трансформатор силовой основного источника питания 1, вводной выключатель шин подстанции основного источника питания 2, ГВ линии основного источника питания 3, точку КЗ 4, секционирующий выключатель линии основного источника питания 5, выключатель сетевого пункта АВР 6, секционирующий выключатель линии резервного источника питания 7, ГВ линии резервного источника питания 8, СВ шин подстанции 9, вводной выключатель шин резервного источника питания 10, трансформатор силовой резервного источника питания 11, датчик тока короткого замыкания (ДТКЗ) 12, Элементы: ПАМЯТЬ 13, ЗАДЕРЖКА 14, ОДНОВИБРАТОР 15, НЕ 16, датчик напряжения (ДН) 17, НЕ 18, И 19, НЕ 20, И 21. регистрирующие устройство (РУ) 22.

Диаграммы сигналов на выходах элементов, показанных на рисунке 1 при устойчивом КЗ в точке 4 (см. рис.

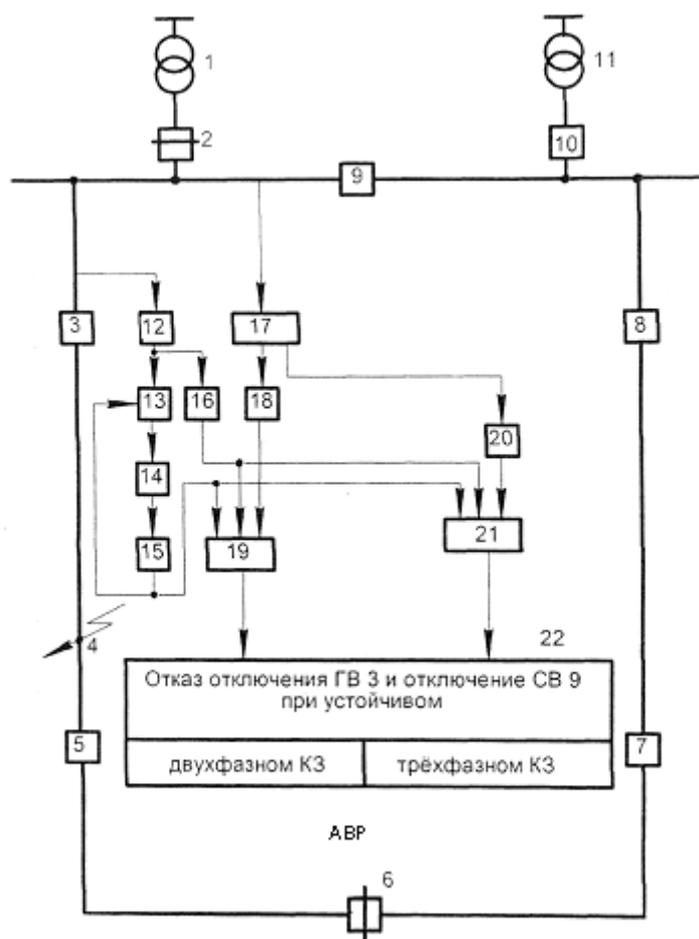


Рис. 1. Упрощенная схема кольцевой сети и структурная схема подстанционного включения резерва

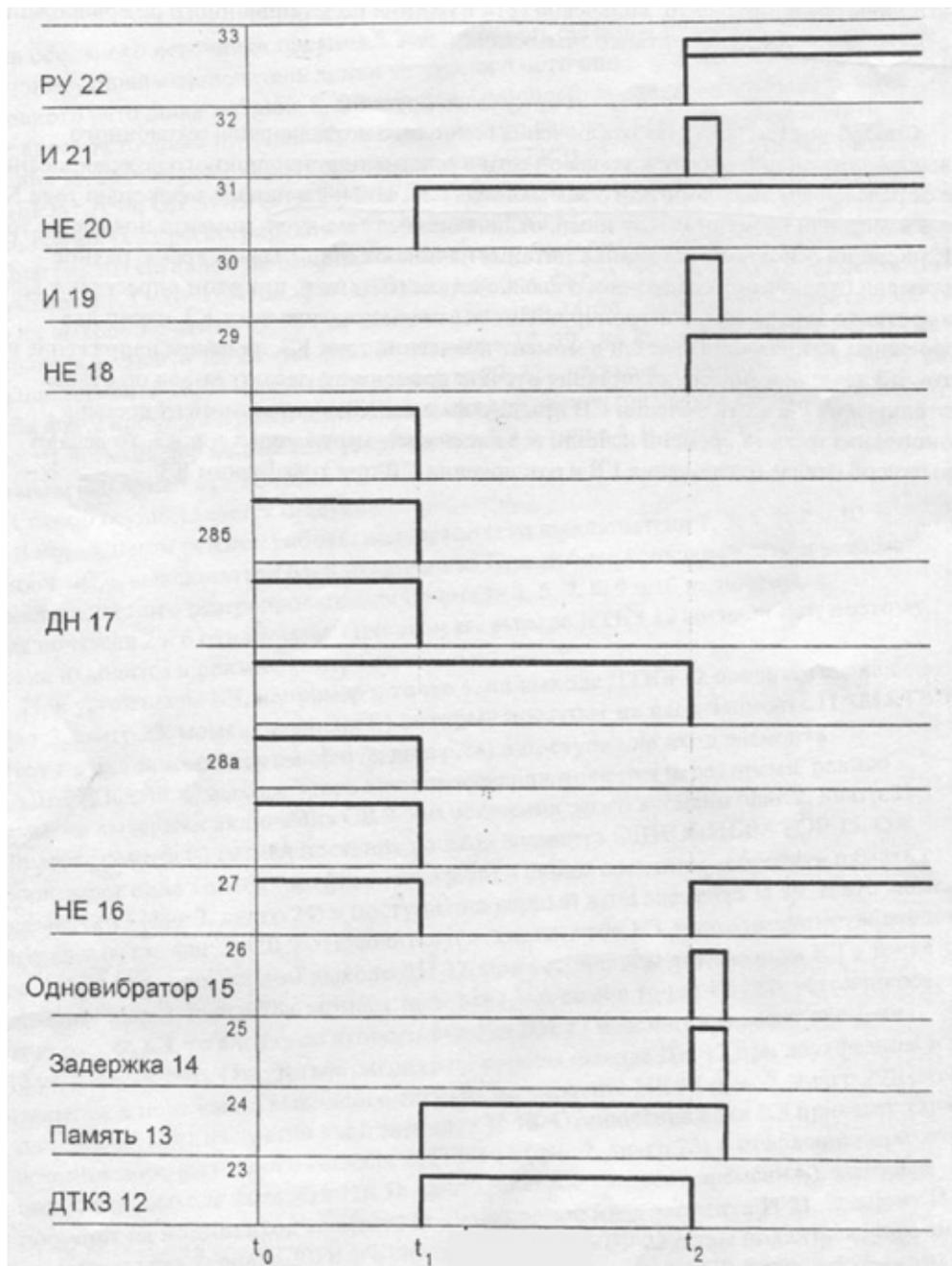


Рис. 2. Диаграммы выходных сигналов элементов структурной схемы

1) имеют вид (см. рис. 2): 23 — на выходе элемента 12, 24 — на выходе элемента 13, 25 — на выходе элемента 14, 26 — на выходе элемента 15, 27 — на выходе элемента 16, 28 — на выходе элемента 17, 29 — на выходе элемента 18, 30 — на выходе элемента 19, 31 — на выходе элемента 20, 32 — на входе элемента 21, 33 — в РУ 22.

На рис. 2 кроме диаграмм выходных сигналов элементов схемы также показаны: t_1 — момент времени возникновения устойчивого КЗ в точке 4, t_2 — момент окончания времени выдержки отключения СВ 9.

В нормальном режиме работы кольцевой сети выключатели 2, 3, 5, 7, 8 и 10 включены, а выключатели 6 и 9 отключены. При работе кольцевой сети в режиме подстан-

ционного резервирования выключатели 3, 5, 7, 8, 9 и 10 включены, а выключатели 2 и 6 отключены. При этом на выходе ДТКЗ 12 сигнала нет, поэтому схема находится в режиме контроля.

При устойчивом КЗ, например в точке 4, на выходе ДТКЗ 12 появится сигнал (рис. 2, диагр. 23, момент времени t_1) который поступит на вход элемента ПАМЯТЬ 13. Этот сигнал запомнится им (рис. 2, диагр. 24) и поступит на вход элемента ЗАДЕРЖКА 14. С выхода этого элемента сигнал появится через время, равное времени выдержки включения СВ 9. По истечении этого времени (рис. 2, диагр. 25, момент времени t_2) сигнал поступит на вход элемента ОДНОВИБРАТОР 15. Он произведет одно колебание (рис. 2, диагр. 26) и своим сигналом

«сбросит» память с элемента 13 (рис. 2, диагр. 24) и поступит на первый вход элемента И 19. В это момент времени (t_2 , рис. 2) СВ 9 отключится и отключит ток КЗ, поэтому существовавший до этого сигнал на первом выходе ДН 17, при устойчивом двухфазном КЗ в точке 4, исчезнет (рис. 2, диагр. 28а, момент времени t_2). А если в точке 4 будет устойчивое трехфазное КЗ, то сигнал со второго выхода ДН 17 исчезнет в момент времени t_2 (рис. 2, диагр. 28б). Отсутствие сигнала на первом выходе ДН 17 при двухфазном КЗ приведет к появлению выходного сигнала на элементе НЕ 18 (рис. 2, диагр. 29). Этот сигнал поступит на третий вход элемента И 18. Отключение тока КЗ приведет также к исчезновению выходного сигнала с ДТКЗ 12 (рис. 2, диагр. 23) и появлению при этом сигнала на выходе элемента НЕ 16 (рис. 2, диагр. 27, момент времени t_2), который поступит на второй вход элемента

И 19 на второй вход элемента И 21. Элемент И 19 сработает (рис. 2, диагр. 30) и его сигнал поступит в РУ 22 и там появиться информация о том, что произошел отказ отключения ГВ 3 и отключение СВ 9 при двухфазном КЗ. При трехфазном КЗ в точке 4 на элемент И 21 входные сигналы поступят с элементов ОДНОВИБРАТОР 15, НЕ 16 и НЕ 20 (рис. 2, диагр. 26, 27 и 31 соответственно) и он сработает в момент времени t_2 и его выходной сигнал (рис. 2, диагр. 32) поступив в 1 РУ 22 обеспечит появление нем информации об отказе отключения ГВ 3 и отключении СВ 9 при трехфазном КЗ.

Таким образом, можно получать информацию об отказе отключения головного и отключении секционного выключателей при работе кольцевой сети в режиме подстанционного резервирования с определением вида короткого замыкания.

Литература:

1. Патент РФ №2504062, опубл. 10.01.2014, бюл.№1.

Молодой ученый

Ежемесячный научный журнал

№ 16 (75) / 2014

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Главный редактор:

Ахметова Г. Д.

Члены редакционной коллегии:

Ахметова М. Н.
Иванова Ю. В.
Лактионов К. С.
Сараева Н. М.
Авдеюк О. А.
Алиева Т. И.
Ахметова В. В.
Брезгин В. С.
Данилов О. Е.
Дёмин А. В.
Дядюн К. В.
Желнова К. В.
Жуйкова Т. П.
Игнатова М. А.
Каленский А. В.
Коварда В. В.
Комогорцев М. Г.
Котляров А. В.
Кузьмина В. М.
Кучерявенко С. А.
Лескова Е. В.
Макеева И. А.
Мусаева У. А.
Насимов М. О.
Прончев Г. Б.
Семахин А. М.
Сенюшкин Н. С.
Ткаченко И. Г.
Яхина А. С.

Ответственные редакторы:

Кайнова Г. А., Осянина Е. И.

Международный редакционный совет:

Айрян З. Г. (Армения)
Арошидзе П. Л. (Грузия)
Атаев З. В. (Россия)
Борисов В. В. (Украина)
Велковска Г. Ц. (Болгария)
Гайич Т. (Сербия)
Данатаров А. (Туркменистан)
Данилов А. М. (Россия)
Досманбетова З. Р. (Казахстан)
Ешиев А. М. (Кыргызстан)
Игисинов Н. С. (Казахстан)
Кадыров К. Б. (Узбекистан)
Кайгородов И. Б. (Бразилия)
Каленский А. В. (Россия)
Козырева О. А. (Россия)
Лю Цзюань (Китай)
Малес Л. В. (Украина)
Нагервадзе М. А. (Грузия)
Прокопьев Н. Я. (Россия)
Прокофьева М. А. (Казахстан)
Ребезов М. Б. (Россия)
Сорока Ю. Г. (Украина)
Узаков Г. Н. (Узбекистан)
Хоналиев Н. Х. (Таджикистан)
Хоссейни А. (Иран)
Шарипов А. К. (Казахстан)

Художник: Шишков Е. А.

Верстка: Бурьянов П. Я.

Статьи, поступающие в редакцию, рецензируются.

За достоверность сведений, изложенных в статьях, ответственность несут авторы.

Мнение редакции может не совпадать с мнением авторов материалов.

При перепечатке ссылка на журнал обязательна.

Материалы публикуются в авторской редакции.

АДРЕС РЕДАКЦИИ:

420126, г. Казань, ул. Амирхана, 10а, а/я 231.

E-mail: info@moluch.ru

http://www.moluch.ru/

Учредитель и издатель:

ООО «Издательство Молодой ученый»

ISSN 2072-0297

Тираж 1000 экз.

Отпечатано в типографии издательства «Молодой ученый», г. Казань, ул. Академика Арбузова, д. 4