

ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԱԶԳԱՅԻՆ ԱԿԱԴԵՄԻԱՅԻ ԵՎ
ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԱԶԳԱՅԻՆ ՊՈԼԻՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆԻ

ՏԵՂԵԿԱԳԻՐ ИЗВЕСТИЯ

НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК АРМЕНИИ И
НАЦИОНАЛЬНОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
АРМЕНИИ

ՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՍԵՐԻԱ
СЕРИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК

ԵՐԵՎԱՆ

ЕРЕВАН

Журнал издается с 5.01.1948 г.
Выходит 3 раза в год

ԽՄԲԱԳՐԱԿԱՆ ԿՈԼԵԳԻԱ

Ռ.Մ. ՄԱՐՏԻՐՈՍՅԱՆ (գլխավոր խմբագիր), **Հ.Ա. ԹԵՐԶՅԱՆ** (գլխ. խմբ. տեղակալ), **Զ.Կ. ՍՏԵՓԱՆՅԱՆ** (պատասխանատու քարտուղար), **Ս.Գ. ԱՂԲԱԼՅԱՆ**,
Ռ.Վ. ԱԹՈՅԱՆ, **Վ.Վ. ԲՈՒՆԻԱՏՅԱՆ**, **Ս.Պ. ՂԱՎԹՅԱՆ**, **Ս.Ս. ՂԱԶԱՐՅԱՆ**,
Ո.Զ. ՍԱՐԴՈՒԽՅԱՆ, **ՅՈՒ.Լ. ՍԱՐԳՍՅԱՆ**, **Վ.Ս. ՍԱՐԳՍՅԱՆ**,
Ս.Հ. ՄԻՍՈՆՅԱՆ, **Ս.Գ. ՍՏԱԿՅԱՆ**, **Վ.Ս. ԽԱՉԱՏՐՅԱՆ**

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Р.М. МАРТИРОСЯН (главный редактор), **А.А. ТЕРЗЯН** (зам. глав. редактора),
З.К. СТЕПАНЯН (ответственный секретарь), **С.Г. АГБАЛЯН**,
Р.В. АТОЯН, **В.В. БУНИАТЯН**, **С.П. ДАВТЯН**, **С.М. КАЗАРЯН**,
В.З. МАРУХЯН, **Ю.Л. САРКИСЯН**, **В.С. САРКИСЯН**,
С.О. СИМОНЯН, **М.Г. СТАКЯН**, **В.С. ХАЧАТРЯН**

EDITORIAL BOARD

R.M. MARTIROSSYAN (Editor-in-Chief), **H.A. TERZYAN** (Vice-Editor-in-Chief),
Z.K. STEPANYAN (Secretary - in - Chief), **S.G. AGHBALYAN**,
R.V. ATOYAN, **V.V. BUNIATYAN**, **S.P. DAVTYAN**, **S.M. GHAZARYAN**,
V.Z. MARUKHYAN, **YU.L. SARKISSYAN**, **V.S. SARKISSYAN**,
S.H. SIMONYAN, **M.G. STAKYAN**, **V.S. KHACHATRYAN**

ՏՊԱԳՐՎԱԾ Է ՀԱՐԱՎԱՅԻՆ ԿԱԼԻՖՈՐՆԻԱՅԻ ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆԻ ՀԱՅ
ԱՍՊԻՐԱՆՏՆԵՐԻ ԵՎ ՄԱԳԻՍՏՐԱՆՏՆԵՐԻ ԸՆԿԵՐԱԿՑՈՒԹՅԱՆ
ՀՈՎԱՆԱՎՈՐՈՒԹՅԱՄԲ

ПЕЧАТАЕТСЯ ПРИ СОДЕЙСТВИИ АССОЦИАЦИИ АРМЯНСКИХ АСПИРАНТОВ И
МАГИСТРАНТОВ ЮЖНО-КАЛИФОРНИЙСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

PRINTED BY THE SUPPORT OF USC ARMENIAN GRADUATE STUDENT'S
ASSOCIATION

Հրատ. խմբագիր՝

ԺԱՆՆԱ ՄԵՅՐԱՆՅԱՆ

Համակարգչային շարվածքը
և ձևավորումը

ԼԻԼԻԹ ՄԱՐՏԻՐՈՍՅԱՆԻ

Խմբագիրներ՝

ԼԵՅԼԱ ՍՏԵՓԱՆՅԱՆ
ՆԵԼԼԻ ԱՆԱՆՅԱՆ

© Издательство ГИУА
Известия НАН и ГИУ Армении (сер. техн. наук), 2006

Ю.Л. САРКИСЯН, К.Г. СТЕПАНЯН, Г.А. ГЕВОРКЯН

ДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ УПРУГИХ ДРЕВОВИДНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ БЕЗ ВНЕШНИХ СВЯЗЕЙ

Предлагается распространение составленного на основе обобщенного метода Ньютона-Эйлера алгоритма динамического анализа упругих манипуляторов на случай упругих древовидных механических систем, свободных от внешних ограничений. Оснащенная расчетная схема численного решения смешанной задачи динамики сохраняет в итоге все преимущества, достигнутые ранее при построении отработанного алгоритма.

Ключевые слова: упругие древовидные системы, дифференциальные уравнения движения, алгоритм динамического анализа.

1. **Введение.** Предлагаемая статья является продолжением [1]. Здесь представлены результаты теоретических исследований в области оптимизации динамического анализа линейных внешних связей сложных многосвязных систем с упругими звеньями. Постановка смешанной задачи динамики и ее решение обобщенным методом Ньютона-Эйлера, сформулированные ранее в [1] для упругих манипуляторов, подлежат обобщению на упругие древовидные динамические системы без внешних связей с построением расчетного алгоритма степени сложности, пропорционального размерности рассматриваемых систем, т.е. $O(n)$.

2. **Уравнения динамического равновесия упругого «узлового» звена.** Рассмотрим сложную динамическую систему, состоящую из n линейно-деформируемых звеньев, кинематические цепи которой образуют древовидную структуру, изображенную на рис. 1. Предполагается далее, что древовидная система (рис. 1) состоит из упругих звеньев $C_j \in \{M\}$, $j=1, \dots, n$, которые соединены между собой поступательными или вращательными кинематическими парами в точках A_j , $j \in \{1, \dots, n\}$, определяемыми логической переменной σ_j , $j=1, \dots, n$ [1], а смешанная задача динамики формулируется для данного класса систем аналогично постановке смешанной задачи динамики упругих манипуляторов с использованием идентификатора χ_j , $j=1, \dots, n$ [1]. Однако при динамическом анализе систем сложной структурной иерархии на основе метода Ньютона-Эйлера, в отличие от систем простой кинематической цепи, состоящих из так называемых «простых» звеньев, возникает необходимость особого описания уравнений движения так называемых «узловых» звеньев системы, коими на примере системы, изображенной на рис. 1, являются структурные элементы C_2, C_4 и C_6 .

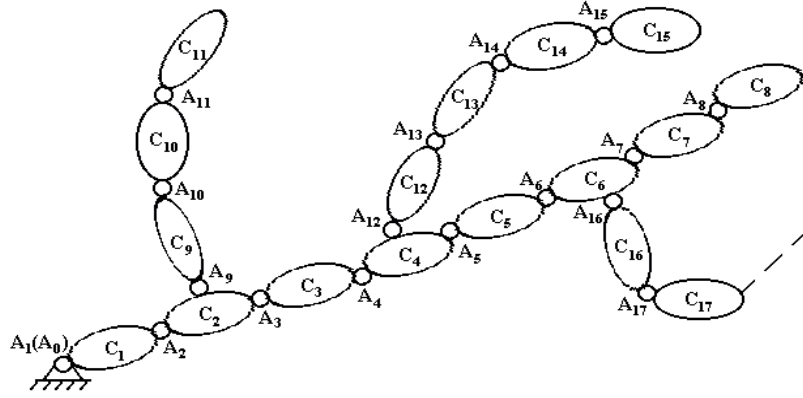


Рис. 1

Пусть имеются два подмножества $\{\bar{M}\} = \{\bar{C}_1, \bar{C}_2, \dots, \bar{C}_\varphi\}$ и $\{\tilde{M}\} = \{\tilde{C}_1, \tilde{C}_2, \dots, \tilde{C}_\psi\}$, где φ и ψ – натуральные числа, представляющие собой соответственно количества «простых» и «узловых» звеньев некоторой древовидной динамической системы при отсутствии внешних связей, которые удовлетворяют условиям $\{\bar{M}\} \cup \{\tilde{M}\} = \{M\}$ и $\varphi + \psi = n$.

Рассмотрим подмножество $\{\tilde{M}\}$ упругих «узловых» звеньев системы $\tilde{C}_l, l \in \{1, \dots, \psi\}$, имеющих одну входящую подвижную систему отсчета Q_j , начало которой жестко связано с точкой $A_j, j \in \{1, \dots, n\}$, и η_l выходящих подвижных систем координат Q_{a_k} , начала которых зафиксированы в точках A_{a_k} , где $a_k > j, k = 1, \dots, \eta_l, l \in \{1, \dots, \psi\}$ (рис. 2). Ввиду необходимости учета различных условий задачи динамики в парах $a_k, k = 1, \dots, \eta_l, l \in \{1, \dots, \psi\}$ разлагаем множество $\{A_l\} = \{a_1, a_2, \dots, a_{\eta_l}\}$ на подмножества $\{B_l\} = \{b_1, b_2, \dots, b_{\xi_l}\}$ и $\{C_l\} = \{c_1, c_2, \dots, c_{\zeta_l}\}$ для $l \in \{1, \dots, \psi\}$, причём $\{A_l\} = \{B_l\} \cup \{C_l\}, l \in \{1, \dots, \psi\}$, где ξ_l и ζ_l – натуральные числа, характеризующие соответственно количества пар $b_i, i = 1, \dots, \xi_l$ и $c_k, k = 1, \dots, \zeta_l$ при $l \in \{1, \dots, \psi\}$, для которых выполняются следующие условия логической переменной χ : $\chi_{b_i} = 0, \forall b_i \in \{B_l\}, i = 1, \dots, \xi_l$ и $\chi_{c_k} = 1, \forall c_k \in \{C_l\}, k = 1, \dots, \zeta_l$ при $l \in \{1, \dots, \psi\}$. Эти натуральные числа связаны между собой очевидным равенством $\xi_l + \zeta_l = \eta_l, l \in \{1, \dots, \psi\}$. На основании вышеизложенного нелинейные дифференциальные уравнения движения упругого «узлового» звена $C_j \in \{M\}$ можно представить в следующем виде:

$$\begin{bmatrix} {}^j J_{\pi j}^* & {}^j J_{\pi j}^* \\ {}^j J_{e j}^* & {}^j J_{e j}^* \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} {}^j \tilde{\mathbf{V}}_j \\ {}^j \tilde{\mathbf{q}}_j^e \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} {}^j \tilde{\mathbf{C}}_j^{r*} \\ {}^j \tilde{\mathbf{C}}_j^{e*} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^j \tilde{\mathbf{F}}_j \\ \mathbf{0}_{N_j} \end{bmatrix}, \quad j \in \{1, \dots, n\}, \quad (1)$$

где

$$\left\{ \begin{array}{l} {}^j\mathbf{J}_{\pi j}^* = {}^j\mathbf{J}_{\pi j} + \sum_{i=1}^{\xi_l} {}^{b_i}\mathbf{T}_j^T \cdot \tilde{\mathbf{G}}_{b_i} + \sum_{k=1}^{\zeta_l} {}^{c_k}\mathbf{T}_j^T \cdot \tilde{\mathbf{G}}_{c_k}, \\ {}^j\mathbf{J}_{\pi j}^* = {}^j\mathbf{J}_{\pi j} + \sum_{i=1}^{\xi_l} {}^{b_i}\mathbf{T}_j^T \cdot \tilde{\mathbf{H}}_{b_i} + \sum_{k=1}^{\zeta_l} {}^{c_k}\mathbf{T}_j^T \cdot \tilde{\mathbf{H}}_{c_k}, \\ {}^j\mathbf{J}_{\pi j}^* = {}^j\mathbf{J}_{\pi j} + \sum_{i=1}^{\xi_l} {}^j\Phi_j^T(A_{b_i}) \cdot {}^{b_i}\mathbf{R}_j^T \cdot \tilde{\mathbf{G}}_{b_i} + \sum_{k=1}^{\zeta_l} {}^j\Phi_j^T(A_{c_k}) \cdot {}^{c_k}\mathbf{R}_j^T \cdot \tilde{\mathbf{G}}_{c_k}, \\ {}^j\mathbf{J}_{\pi j}^* = {}^j\mathbf{J}_{\pi j} + \sum_{i=1}^{\xi_l} {}^j\Phi_j^T(A_{b_i}) \cdot {}^{b_i}\mathbf{R}_j^T \cdot \tilde{\mathbf{H}}_{b_i} + \sum_{k=1}^{\zeta_l} {}^j\Phi_j^T(A_{c_k}) \cdot {}^{c_k}\mathbf{R}_j^T \cdot \tilde{\mathbf{H}}_{c_k}; \end{array} \right. \quad (2)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} {}^j\tilde{\mathbf{C}}_j^{r*} = {}^j\tilde{\mathbf{C}}_j^r + \sum_{i=1}^{\xi_l} {}^{b_i}\mathbf{T}_j^T \cdot {}^{b_i}\tilde{\mathbf{p}}_{b_i} + \sum_{k=1}^{\zeta_l} {}^{c_k}\mathbf{T}_j^T \cdot {}^{c_k}\tilde{\mathbf{p}}_{c_k}, \\ {}^j\tilde{\mathbf{C}}_j^{e*} = {}^j\tilde{\mathbf{C}}_j^e + \sum_{i=1}^{\xi_l} {}^j\Phi_j^T(A_{b_i}) \cdot {}^{b_i}\mathbf{R}_j^T \cdot {}^{b_i}\tilde{\mathbf{p}}_{b_i} + \sum_{k=1}^{\zeta_l} {}^j\Phi_j^T(A_{c_k}) \cdot {}^{c_k}\mathbf{R}_j^T \cdot {}^{c_k}\tilde{\mathbf{p}}_{c_k}. \end{array} \right. \quad (3)$$

В выражениях (2) - (3) принимаем во внимание обозначения

$$\left\{ \begin{array}{l} \tilde{\mathbf{G}}_{b_i} = \mathbf{G}_{b_i} - \mathbf{U}_{b_i} \cdot {}^{b_i}\mathbf{T}_j, \text{ где } \mathbf{G}_{b_i} = \mathbf{K}_{b_i} \cdot {}^{b_i}\mathbf{T}_j, \\ \tilde{\mathbf{H}}_{b_i} = \mathbf{H}_{b_i} - \mathbf{U}_{b_i} \cdot {}^{b_i}\mathbf{R}_j \cdot {}^j\Phi_j(A_{b_i}), \text{ где } \mathbf{H}_{b_i} = \mathbf{K}_{b_i} \cdot {}^{b_i}\mathbf{R}_j \cdot {}^j\Phi_j(A_{b_i}), \\ {}^{b_i}\tilde{\mathbf{p}}_{b_i} = {}^{b_i}\bar{\mathbf{p}}_{b_i} + \mathbf{K}_{b_i} \cdot {}^{b_i}\bar{\mathbf{a}}_{b_i} \cdot (\tau_{b_i} - {}^{b_i}\bar{\mathbf{a}}_{b_i}^T \cdot {}^{b_i}\bar{\mathbf{p}}_{b_i}) \cdot Z_{b_i}, \text{ где} \\ {}^{b_i}\bar{\mathbf{p}}_{b_i} = \mathbf{K}_{b_i} \cdot {}^{b_i}\bar{\mathbf{h}}_{b_i}(A_{b_i}) + {}^{b_i}\bar{\mathbf{m}}_{b_i}, \end{array} \right. \quad (4)$$

прич, м

$$\mathbf{U}_{b_i} = Z_{b_i} \cdot \mathbf{K}_{b_i} \cdot {}^{b_i}\bar{\mathbf{a}}_{b_i} \cdot {}^{b_i}\bar{\mathbf{a}}_{b_i}^T \cdot \mathbf{K}_{b_i} \quad \text{и} \quad Z_{b_i} = 1 / ({}^{b_i}\bar{\mathbf{a}}_{b_i}^T \cdot \mathbf{K}_{b_i} \cdot {}^{b_i}\bar{\mathbf{a}}_{b_i}),$$

а также учитываем сокращения

$$\left\{ \begin{array}{l} \tilde{\mathbf{G}}_{c_k} = \mathbf{G}_{c_k}, \text{ где } \mathbf{G}_{c_k} = \mathbf{K}_{c_k} \cdot {}^{c_k}\mathbf{T}_j; \\ \tilde{\mathbf{H}}_{c_k} = \mathbf{H}_{c_k}, \text{ где } \mathbf{H}_{c_k} = \mathbf{K}_{c_k} \cdot {}^{c_k}\mathbf{R}_j \cdot {}^j\Phi_j(A_{c_k}); \\ {}^{c_k}\tilde{\mathbf{p}}_{c_k} = {}^{c_k}\bar{\mathbf{p}}_{c_k} + \mathbf{K}_{c_k} \cdot {}^{c_k}\bar{\mathbf{a}}_{c_k} \cdot \ddot{\mathbf{q}}_{c_k}^r, \text{ где } {}^{c_k}\bar{\mathbf{p}}_{c_k} = \mathbf{K}_{c_k} \cdot {}^{c_k}\bar{\mathbf{h}}_{c_k}(A_{c_k}) + {}^{c_k}\bar{\mathbf{m}}_{c_k}. \end{array} \right. \quad (5)$$

Пояснения всех остальных неопределенных символов, фигурирующих в выражениях (1) - (5), приводятся в публикациях [1,2].

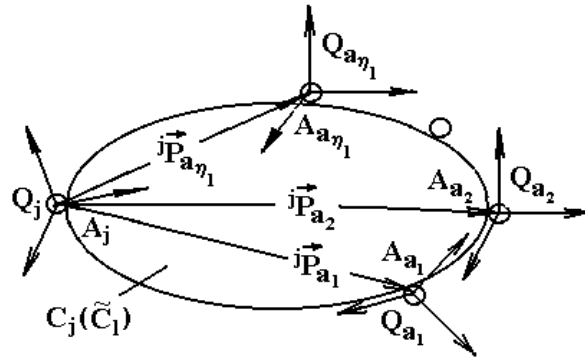


Рис. 2

3. Схема алгоритма динамического анализа. Построение алгоритма решения смешанной задачи динамики древовидных систем с упругими звеньями при отсутствии внешних связей производится на основе обобщенного метода Ньютона-Эйлера в три расчетно-символических цикла, аналогично решению одноименной задачи упругих манипуляторов [1]. Для этого требуется лишь включение в вычислительную схему опорного алгоритма расчетного модуля «узлов» звена, динамическая модель которого описывается выражениями (1) - (5).

В итоге схема расчетного алгоритма степени сложности $O(n)$ упругих древовидных систем без внешних связей предусматривает для каждого момента $t \in [0, T]$, где T - конечное время функционирования системы, следующую последовательность вычислительных процедур :

1 - я рекурсивная процедура, включающая для $j=1, \dots, n$:

- расчет необходимых матриц, векторов и постоянной [2]: ${}^j\mathbf{R}_{j-1}, {}^j\mathbf{T}_{j-1}, {}^j\mathbf{J}_{\pi j}, {}^j\mathbf{J}_{\text{ге}j}, {}^j\mathbf{J}_{\text{св}j}, {}^j\bar{\mathbf{C}}_j^r, {}^j\bar{\mathbf{C}}_j^e, {}^j\bar{\mathbf{h}}_j, {}^j\bar{\mathbf{a}}_j$ и $\tau_j = \tau_j(\Gamma_j)$, если $\chi_j = 0$;
- кинематический расчет главной цепи $(C_1 - C_8)$;
- кинематический расчет производных цепей $(C_9 - C_{11}), (C_{12} - C_{15}), (C_{16} - C_{17})$ и т.д. в указанной последовательности;

2 - я рекурсивная процедура, предполагающая для $j=n, \dots, 1$:

символический расчет производных цепей $\dots, (C_{17} - C_{16}), (C_{15} - C_{12})$ и $(C_{11} - C_9)$ в означенной последовательности с использованием алгоритмического модуля для «простого» звена;
символический расчет главной цепи $(C_1 - C_8)$ с совместным использованием модулей для «простого» и «узлов» звеньев;

3-я рекурсивная процедура, требующая для $j=1, \dots, n$:

- динамический расч,т главной цепи ($C_1 - C_8$);
- динамический расч,т производных цепей ($C_9 - C_{11}$), ($C_{12} - C_{15}$), ($C_{16} - C_{17}$) и т.д. в отмеченной последовательности.

Теоретическое обоснование эффективности представленного расч,тного алгоритма динамического анализа упругих древовидных систем без внешних связей вытекает из сопоставления зависимостей числа расч,тных операций от размерности исследуемых систем, т.е. $O(n)$ и $O(n^3)$. Очевидно, что, начиная с некоторого значения n , характеристика $O(n^3)$, свойственная формализму Лагранжа, резко отделяется от характеристики $O(n)$, присущей формализму Ньютона-Эйлера. Отсюда следует особая целесообразность использования предложенного алгоритма для анализа сложных упругих систем большой размерности [3].

4. **Численная реализация предложенного алгоритма динамического расч,та.** В качестве примера упругой древовидной динамической системы без внешних связей рассмотрим плоский комбинированный манипулятор, представленный на рис. 3. «Узловое» звено системы (A_2A_3) предполагаем линейно-упругим, а остальные звенья – абсолютно жесткими.

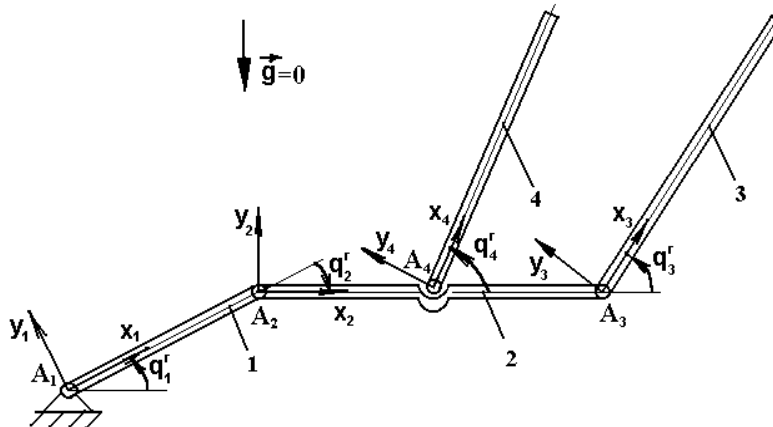


Рис. 3

Физико-механические характеристики звеньев круглого поперечного сечения радиуса $r = 3,0 \cdot 10^{-3} \text{ м}$: $\rho_i = 7800 \text{ кг/м}^3$, $i = 1, \dots, 4$; $l_1 = 0,1 \text{ м}$, $l_i = 0,35 \text{ м}$, $i = 2, \dots, 4$; $A_2A_4 = l_2 / 2$; $E_2 = 200 \text{ ГПа}$. Далее, указав начальные условия движения системы для обобщ,нных координат $q_i^r(0) = \dot{q}_i^r(0) = 0$, $i = 1, \dots, 4$ и для

упругой переменной $\ddot{q}_2^e(0) = \dot{q}_2^e(0) = 0$, где $N_2 = 1$, решаем смешанную задачу динамики с заданными функциями приводных моментов $C_i(t) = 1H \cdot M$, $i = 1, \dots, 3$ и обобщенного ускорения $\ddot{q}_4^r(t) = 100 M/c^2$ в интервале интегрирования $t \in [0; 0,15c]$. Графики зависимостей обобщенных координат q_i^r , $i = 1, \dots, 3$ и приводного момента C_4 от времени t изображены на рис. 4 а,б, а изменение линейной деформации ${}^2\ddot{u}_2(A_3)$ во времени – на рис. 4 в. Программное обеспечение расчетного алгоритма реализовано на языке Turbo Pascal, а контрольный тест произведен на PC PENTIUM 100 с использованием переменных расширенного типа точности Extended, продуцируя машинное время численного решения задачи $TEP = 6$ с.

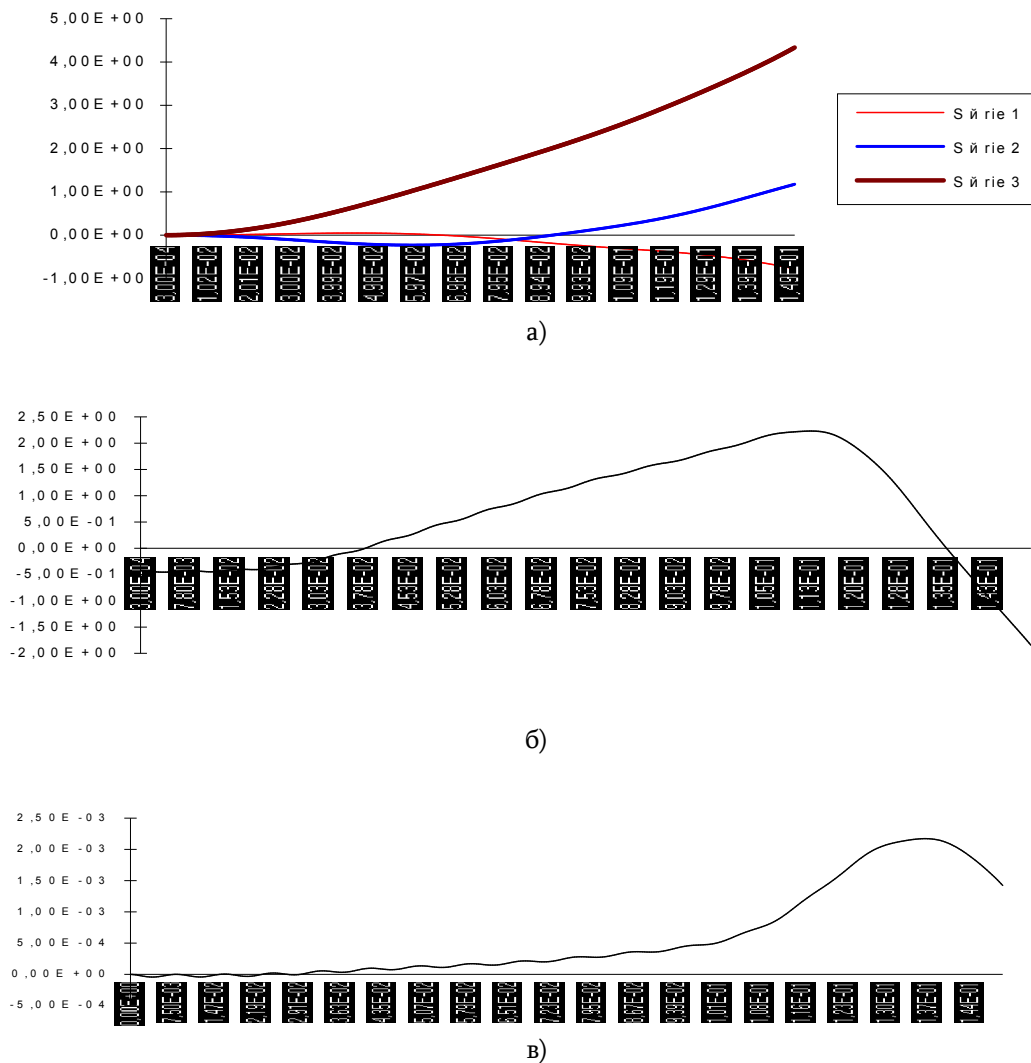


Рис. 4

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Саркисян Ю.Л., Степанян К.Г., Азиз Н., Геворкян Г.А. Динамический анализ упругих манипуляторов обобщенным методом Ньютона-Эйлера // Известия НАН РА и ГИУА. Сер.ТН. - 2004. - Т. 57, N1. - С. 3 - 10.
2. Boyer F. and Khalil W. An efficient calculation of flexible manipulator inverse dynamics // Int. J. Robotics Research. - 1998. - V. 17, N3. - P. 282 - 293.
3. Verlinden O. Simulation du comportement dynamique de systemes multicorps flexibles comportant des membrures de forme complexe: These de Doctorat de la Faculté Polytechnique de Mons (Belgique). - 1994. - 222 p.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 10.10.2005.

Յու.Լ. ՄԱՐԳՍՅԱՆ, Կ.Գ. ՍՏԵՓԱՆՅԱՆ, Զ.Ա. ԳԵՎՈՐԳՅԱՆ

ԱՌԱՋԳԱԿԱՆ ՃՅՈՒՂԱՎՈՐՎԱԾ ՄԵԽԱՆԻԿԱԿԱՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳԵՐԻ ԴԻՆԱՄԻԿԱԿԱՆ ՎԵՐ- ԼՈՒԾՈՒԹՅՈՒՆԸ ԱՐՏԱՔԻՆ ԿԱՊԵՐԻ ԲԱՑԱԿԱՑՈՒԹՅԱՆ ԴԵՊՔՈՒՄ

Առաջարկվում է Նյուտոն-Էյլերի ընդհանրացված մեթոդի հիման վրա կազմված առաձգական մանիպուլյատորների դինամիկական վերլուծության ալգորիթմի տարածումը առանց արտաքին կապերի առաձգական ճյուղավորված մեխանիկական համակարգերի վրա: Արդյունքում մշակված դինամիկայի խառը խնդրի թվային լուծման հաշվարկային սխեման պահպանում է իր հիմքում դրված ալգորիթմի բոլոր բացահայտված առավելությունները:

Առանցքային բաներ. առաձգական ճյուղավորված համակարգեր, շարժման դիֆերենցիալ հավասարումներ, դինամիկական վերլուծության ալգորիթմ :

Yu.L. SARGSYAN, K.G. STEPANYAN, H.A. GEVORGYAN

DYNAMIC ANALYSIS OF FLEXIBLE TREE-LIKE MECHANICAL SYSTEMS WITHOUT EXTERNAL CONSTRAINTS

An extension of the dynamical analysis algorithm of flexible manipulators is proposed for flexible tree-like mechanical systems without external constraints. The generalized algorithm of numerical calculation for the mixed dynamical problem maintains all the revealed advantages of the basic algorithm.

Keywords: flexible tree-like systems, differential equations of motion, dynamic analysis algorithm.

Մ.Գ. ՍՏԱԿՅԱՆ, Ա.Գ. ՄԱՐԳԱՐՅԱՆ, Մ.Ա. ՄԱՆՈՒԿՅԱՆ

ԿՈՌՈՋԻՈՆ ՀՈԳՆԱԾԱՅԻՆ ԴԻՄԱԴՐՈՒԹՅԱՆ ԳՆԱՀԱՏՄԱՆ ՄԵԹՈԴԱԲԱՆՈՒԹՅՈՒՆԸ ԵՎ ՀԱՇՎԱՐԿՆԵՐԻ ԱՎՏՈՄԱՏԱՑՈՒՄԸ

«Օդ-կոռոզիոն միջավայր» և «կոռոզիոն միջավայր-կոռոզիոն միջավայր» տիպի համեմատական հոգնածային փորձարկումների համար ստացված են հարաբերական ամրության և երկարակեցության գործակիցների ֆունկցիաները: Ստեղծված են այդ ֆունկցիաների պարամետրերի և գործակիցների հավանական արժեքներ ստանալու, ինչպես նաև համապատասխան նոմոգրամներ կառուցելու ծրագրային միջոցներ, որոնցով կարելի է պարզ գրաֆիկական ընթացակարգերով ստանալ այդ գործակիցների արժեքները:

Առանցքային բառեր: կոռոզիոն հոգնածային դիմադրություն, քվանտիլային գծերի ընտանիք, հարաբերական ամրության և երկարակեցության գործակիցներ, նոմոգրամ:

Մեքենաների և տեխնոլոգիական սարքավորման զգալի թվով դասի համար բնութագրական է աշխատանքը մթնոլորտային և կոռոզիոն ազդեցության պայմաններում, որն իր առանձնահատկությունների և, առաջին հերթին, ծանրաբեռնված մեքենամասերի և հանգույցների աշխատանքային մակերևույթներում ընթացող բարդ էլեկտրաքիմիական և ադսորբցիոն երևույթների հետևանքով էապես է ազդում այդ օբյեկտների երկարակեցության և հուսալիության վրա: Նշված երևույթները մեքենամասերի վտանգավոր հատույթներում ճաքագոյացման և զարգացման անընդհատ ընթացքի պատճառ են դառնում, որոնցում, ի տարբերություն շինություններում աշխատող սարքավորման, չի բացահայտվում դիմացկունության ֆիզիկական սահմանի առկայությունը: Այս առումով կոռոզիոն հոգնածային գործընթացն ընդգրկում է բազմափուլային հոգնածության մի մեծ տիրույթ ($N = 10^5 \dots 10^8$), որի սահմաններում երևույթը նկարագրող մաթեմատիկական մոդելը՝ կոռոզիոն հոգնածության քվանտիլային գծերի ընտանիքը երկձյուղ տեսք ունի:

Ներկա հետազոտությունում օգտագործված են [1]-ի փորձարարական տվյալները:

Գործոնների առանձին կամ տարբեր զուգորդումներով համատեղ ազդեցության մեծ թվով տարբերակների առկայությունը ստիպում է դրանց հաշվարկային գնահատումներում կիրառել համակարգային մոտեցման մեթոդներ: Մասնավորապես, տվյալ աշխատանքում կիրառվել է համակարգման երկմակարդակային սկզբունք:

1-ին մակարդակ. համեմատական հաշվարկային գնահատումներ կատարելիս դիտարկվել են միայն կոռոզիոն հոգնածային դիմադրությանն առնչվող խնդիրները, որի պատճառով համեմատման հնարավոր տարբերակներից ընտրված և երկու հիմնական խմբերում են ընդգրկված այն համեմատական փորձարկումները, որոնք վերաբերում են այս կամ այն գործոնի (ների) ազդեցության գնահատմանը՝ օդում և կոռոզիոն միջավայրերում («օդ - կոռոզիոն միջավայր», աղ. 1, դասիչ՝ BC), կոռոզիոն միջավայրերում («կոռոզիոն միջավայր - կոռոզիոն միջավայր», աղ. 1, դասիչ՝ CC, համեմատական փորձարկումների ստվերապատկած խումբը):

2-րդ մակարդակ. վերոհիշյալ BC և CC խմբերում բեռնվածության ռեժիմի (τ/σ), կոռոզիոն միջավայրի (pH), լարումների կուտակման (α_σ) և պոլիմերային ծածկույթների (Π) պարամետրերի փոփոխականությունը և սահմանափակումները համակարգված են փորձանմուշների խմբաքանակների հետևյալ համեմատությամբ.

- ա) ըստ գործոնների պարամետրերի փոփոխման բնույթի և միջակայքերի,
- բ) ըստ գործոնների առանձին և համատեղ ազդեցության (2, 3 և 4 գործոնների),
- գ) գործոնների համատեղ ազդեցության դեպքում հնարավոր զուգորդություններից միայն գործնական նշանակություն ունեցող տարբերակների ընտրություն (աղ. 1):

[1]-ում ընդունված փորձարարական ծրագրի համաձայն՝ համեմատական փորձարկումների խմբաքանակների դասակարգումն ըստ առանձին կամ համատեղ ազդող գործոնների առկայության (1-ից 4-ը) հանգեցնում է այդ գործոնների զուգորդումների 13 տարատեսակների (աղ. 2) և համեմատական փորձարկումների 72 տարբերակների, որոնցից 48-ը վերաբերում են «օդ - կոռոզիոն միջավայր» համեմատական փորձարկումների BC դասին, իսկ 24-ը՝ «կոռոզիոն միջավայր - կոռոզիոն միջավայր» CC դասին:

Ամրության ավանդական հաշվարկներում միջավայրի ազդեցությունը փորձարկումների BC դասի համար սովորաբար հաշվի են առնում կոռոզիայի գործակցով՝

$$K_{\sigma k} = \sigma_{Rk} / \sigma_R < 1, \quad (1)$$

որտեղ σ_{Rk} -ն և σ_R -ը դիմացկունության սահմաններն են ցիկլերի բազային թվի դեպքում ($N_G = 10^7$ կամ 10^8):

Աղյուսակ 1

Կոռոզիոն հոգնածային փորձարկումների համեմատական գնահատման տարբերակները

№	Դասիչ	Առանձին գործոնի ազդեցությունը				Գործոնների համատեղ ազդեցությունը		
		pH	τ/σ	α_σ	Π	pH, τ/σ	pH, α_σ	pH, Π
1	BC	Гл4-Гл1	—	—	—	Гл4-Гл2	Гл3 - Г2	ГП2-Г1
2		Гл5-Гл2	Гл5-Гл4	Гл6-Г2	ГП2-Г2	Гл4-Гл3	Гл3 - B2	ГП1-Г2
3		Гл6-Гл3	Гл6-Гл4	Гл6-B2	БП2-B2	Гл5-Гл1	Гл6 - Г1	БП2-B1
4		Гл7-Гл3	Гл5-Гл6			Гл5-Гл3	Гл6 - B1	БП1-B2
5		Г2- Г1				Гл6- Гл1	Гл7-Г1	—
6		B2- B1				Гл6-Гл2	Гл7-B1	
7		ГП2-ГП1				Гл7-Гл1	Гл7-Г2	
8		БП2-БП1				Гл7-Гл2	Гл7-B2	
9	CC	Гл7-Гл6				Гл4-Гл7		
10						Гл5-Гл7		

№	Դասիչ	Գործոնների համատեղ ազդեցությունը					
		$\tau/\sigma, \alpha_\sigma$	α_σ, Π	$pH, \tau/\sigma, \alpha_\sigma$	pH, α_σ, Π	$\tau/\sigma, \alpha_\sigma, \Pi$	$pH, \tau/\sigma, \alpha_\sigma, \Pi$
1	BC	–	–	$\Gamma_{\pi 1}-\Gamma_2$	$\Gamma_{\pi 3}-\Gamma_{\Pi 2}$	–	$\Gamma_{\pi 1}-\Gamma_{\Pi 2}$
2		$\Gamma_{\pi 4}-\Gamma_2$	$\Gamma_{\pi 6}-\Gamma_{\Pi 2}$	$\Gamma_{\pi 1}-B_2$	$\Gamma_{\pi 3}-B_{\Pi 2}$	$\Gamma_{\pi 4}-\Gamma_{\Pi 2}$	$\Gamma_{\pi 1}-B_{\Pi 2}$
3		$\Gamma_{\pi 4}-B_2$	$\Gamma_{\pi 6}-B_{\Pi 2}$	$\Gamma_{\pi 2}-\Gamma_2$	$\Gamma_{\pi 6}-\Gamma_{\Pi 1}$	$\Gamma_{\pi 4}-B_{\Pi 2}$	$\Gamma_{\pi 2}-\Gamma_{\Pi 2}$
4		$\Gamma_{\pi 5}-\Gamma_2$		$\Gamma_{\pi 2}-B_2$	$\Gamma_{\pi 6}-B_{\Pi 1}$	$\Gamma_{\pi 5}-\Gamma_{\Pi 2}$	$\Gamma_{\pi 2}-B_{\Pi 2}$
5	CC	$\Gamma_{\pi 5}-B_2$		$\Gamma_{\pi 4}-\Gamma_1$	$\Gamma_{\pi 7}-\Gamma_{\Pi 1}$	$\Gamma_{\pi 5}-B_{\Pi 2}$	$\Gamma_{\pi 4}-\Gamma_{\Pi 1}$
6				$\Gamma_{\pi 4}B_1$	$\Gamma_{\pi 7}-B_{\Pi 1}$		$\Gamma_{\pi 4}-B_{\Pi 1}$
7				$\Gamma_{\pi 5}-\Gamma_1$	$\Gamma_{\pi 7}-\Gamma_{\Pi 2}$		$\Gamma_{\pi 5}-\Gamma_{\Pi 1}$
8				$\Gamma_{\pi 5}-B_1$	$\Gamma_{\pi 7}-B_{\Pi 2}$		$\Gamma_{\pi 5}-B_{\Pi 1}$
9				–			–

Նախագծային հաշվարկներում կառուցվածքի նվազագույն զանգվածի ապահովումը հիմնավորվում է հաշվարկային ընթացակարգերում երկարակեցությունը գնահատող գործակցի ներմուծմամբ՝

$$K_{Nk} = N_k / N < 1, \quad (2)$$

որը որոշակի բեռնվածության ռեժիմներով աշխատող մեքենամասերի և հանգույցների համեմատական հոգնածային փորձարկումներում ստացված ցիկլային երկարակեցությունների հարաբերությունն է:

Աղյուսակ 2

Ազդող գործոնները և դրանց գուգորդումներն ըստ փորձարկումների BC և CC դասերի

№	1		2		3		4	
	BC	CC	BC	CC	BC	CC	BC	CC
1	pH		pH, τ/σ		$pH, \tau/\sigma, \alpha_\sigma$	–	$pH, \tau/\sigma, \alpha_\sigma, \Pi$	–
2	–	τ/σ	pH, α_σ		pH, α_σ, Π		–	
3	–	α_σ	pH, Π	–	–	$\tau/\sigma, \alpha_\sigma, \Pi$	–	
4	–	Π	–	$\tau/\sigma, \alpha_\sigma$	–		–	
5	–		–	α_σ, Π	–		–	

(1), (2)-ին համանման, փորձարկումների CC դասի համար կարելի է գրել՝

$$K_{\sigma Kf} = \sigma_{RKf} / \sigma_{RK}, \quad K_{NKf} = N_{Kf} / N_K, \quad (3)$$

որոնցում f դասիչով նշված են ամրության և երկարակեցության ցուցանիշները հետազոտվող գործոնի ազդեցության դեպքում:

Համաձայն [2]-ի, այդ գործակիցները ($\lg \sigma - \lg N$) կոորդինատային համակարգում N -ի և σ -ի հաստատագրված արժեքների դեպքում հոգնածային

քվանտիլային գծերի համեմատական ընտանիքների հավասարումների համատեղ լուծման արդյունքում փորձարկումների BC և CC դասերի համար, համապատասխանաբար, որոշվում են հետևյալ կերպ՝

$$\lg K_{\sigma Ki} = \lg \sigma_i - \lg \sigma_{Ki}, \quad \lg K_{\sigma Kfi} = \lg \sigma_{Kfi} - \lg \sigma_{Ki} \quad (N_i = \text{const}), \quad (4)$$

$$\lg K_{NKi} = \lg N_i - \lg N_{Ki}, \quad \lg K_{NKfi} = \lg N_{Kfi} - \lg N_{Ki} \quad (\sigma_i = \text{const}): \quad (5)$$

Արդյունքում ստացվում է նշված գործակիցների ֆունկցիաների մի համակարգ՝

$$K_{\sigma K(f)} = f_{4(5)}(N, Z_P), \quad K_{NK(f)} = \varphi_{4(5)}(\sigma, Z_P), \quad (6)$$

որում որպես պարամետր հանդես է գալիս նորմալ բաշխման օրենքի Z_P քվանտիլը: Նշենք N -ի և σ -ի այն միջակայքերը, որոնցում (6) ֆունկցիաների պարամետրերի արժեքները հաստատուն են մնում (աղ. 3):

(7)-ում տրված մեծությունները օդում և կոռոզիոն միջավայրերում (k) փորձարկումների արդյունքով ստացված հոգնածային քվանտիլային գծերի ցուցիչները ($m_{(kf)}^{(i)}$) և պարամետրերն ($C_{(kf)}^{(i)}$) են ձախ և աջ ⁽ⁱ⁾ ճյուղերի համար, առանց կամ տարբեր գործոնների (f) ազդեցություն դեպքերում [1]:

Աղյուսակ 3

(6) ֆունկցիաների տեսքերն ըստ N -ի և σ -ի միջակայքերի

№	N-ի և σ -ի միջակայքերը			$K_{\sigma k(f)} = f_{4(5)}(N, Z_P)$ և $K_{Nk(f)} = \varphi_{4(5)}(\sigma, Z_P)$
1	N	I	$N < N_{Gk(f)} \quad (N < N_{G(k)})$	$\lg K_{\sigma k(f)} = S_{1(f)} - M_{1(f)} \lg N$
2		II	$N_{Gk(f)} \leq N \leq N_{G(k)}$	$\lg K_{\sigma k(f)} = S_{2(f)} - M_{2(f)} \lg N$
3			կամ $N_{G(k)} \leq N \leq N_{Gk(f)}$	$\lg K_{\sigma k(f)} = S'_{2(f)} - M'_{2(f)} \lg N$
4		III	$N > N_{G(k)} \quad (N > N_{Gk(f)})$	$\lg K_{\sigma k(f)} = S_{3(f)} - M_{3(f)} \lg N$
5	σ	I	$\sigma > \sigma_{R(k)}$	$\lg K_{Nk(f)} = \Delta C_{1(f)} - \Delta m_{1(f)} \lg \sigma$
6		II	$\sigma_{R(k)} \geq \sigma \geq \sigma_{Rk(f)}$	$\lg K_{Nk(f)} = \Delta C_{2(f)} - \Delta m_{2(f)} \lg \sigma$
7		III	$\sigma < \sigma_{Rk(f)}$	$\lg K_{Nk(f)} = \Delta C_{3(f)} - \Delta m_{3(f)} \lg \sigma$

$$\left. \begin{aligned} S_{1(f)} &= C_{k(f)}/m_{k(f)} - C_{(k)}/m_{(k)}, S_{2(f)} = C'_{k(f)}/m'_{k(f)} - C_{(k)}/m_{(k)}, S'_2 = S_1 + \lg N_G/m, \\ S'_{2(f)} &= C_{kf}/m_{kf} - C'_k/m'_k, S_3 = S_2 + \lg N_G/m, S_{3f} = C'_{kf}/m'_{kf} - C'_k/m'_k, \\ \Delta C_{1(f)} &= C_{k(f)} - C_{(k)}, \Delta C_2 = \Delta C_1 + m \lg \sigma_R, \Delta C_{2(f)} = C_{kf} - C'_k, \\ \Delta C_3 &= \Delta C'_1 + m \lg \sigma_{Rk}, \Delta C'_1 = C'_k - C, \Delta C_{3f} = C'_{kf} - C'_k, \\ M_{1(f)} &= 1/m_{k(f)} - 1/m_{(k)}, M_{2(f)} = 1/m'_{k(f)} - 1/m_{(k)}, M'_2 = 1/m_k, M'_{2f} = 1/m_{kf} - 1/m'_{kf}, \\ M_3 &= 1/m'_k, M_{3f} = 1/m'_{kf} - 1/m'_k, \Delta m_{1(f)} = m_{k(f)} - m_{(k)}, \Delta m_2 = m_k, \\ \Delta m_{2f} &= m_{kf} - m'_k, \Delta m_3 = m'_k, \Delta m_{3f} = m'_{kf} - m'_k : \end{aligned} \right\} (7)$$

$K_{\sigma k(f)}$, $K_{Nk(f)}$ ֆունկցիաների նմանատիպ փոփոխության պատճառը դրանց ներքին կառուցվածքներում ընդգրկված (1)-(5) վիճակագրական ցուցանիշների միջև [1] –ում բացահայտված բազմապարամետրական կապերն են, որոնք ընդհանուր դեպքում արտահայտվում են հետևյալ ֆունկցիայի տեսքով՝

$$F(\sigma_{R(kf)}, N_{G(kf)}, C^{(k)}, m^{(k)}, s^{(k)}, s_{m(kf)}, s_{Nr(kf)}, z_p) = 0 : (8)$$

Նման կապը թույլ է տալիս՝

ա) կազմել պարամետրական հավասարումների համակարգ, համապատասխան ալգորիթմ և հաշվողական ծրագիր, որոնց միջոցով որոշել դիտարկվող վիճակագրական ցուցանիշների, իսկ դրանցով էլ՝ $K_{\sigma k(f)}$, $K_{Nk(f)}$ գործակիցների արժեքները $(\sigma, N, P(N))$ եռաչափ տարածությունում,

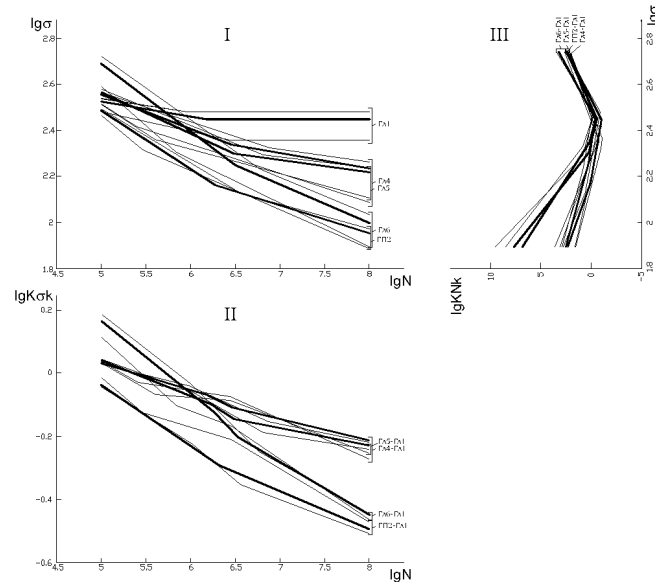
բ) նոմոգրաֆիական մեթոդի կիրառմամբ ստեղծել նոմոգրամներ, որոնց կոորդինատային քառորդամասերում նպատակահարմար կարգով տեղադրելով փոխկապակցված երկչափ ֆունկցիաները՝ պարզ գրաֆիկական կառուցումներով, մեկ քառորդամասից մյուսին անցնելիս, քայլային եղանակով որոշել վիճակագրական ցուցանիշները և նույն գործակիցների հավանական արժեքները:

Որպես կանոն, համեմատական հոգնածային փորձարկումների յուրաքանչյուր դեպքի համար կառուցվում է մեկ նոմոգրամ: Սակայն համեմատական գնահատման ընդհանրացման աստիճանը բարձրացնելու նպատակով դիմում են մի քանի նոմոգրամների համատեղման սկզբունքին, որը թույլ է տալիս հետազոտվող գործոնների ազդեցությունները գնահատելիս, մեկ ընդհանուր ելման փորձարկումների նկատմամբ համեմատել առաջադրվող կառուցվածքային, տեխնոլոգիական կամ շահագործական միջոցառումների կիրառման նպատակահարմարությունը և դրանցից ընտրել լավարկային տարբերակը:

Դիտարկենք մի քանի բնութագրական դեպքեր, որոնք առավելագույնս են ազդում պատասխանատու մեքենամասերի և հանգույցների կոռոզիոն հոգնածային ամրության և երկարակեցության վրա [1].

ա) փորձարկումների BC դասի համար՝ մեկ, երկու և չորս գործոնների ազդեցությունները, երբ համեմատվում են օդում և ջրում հարթ փորձանմուշների փորձարկումները նույն և տարբեր բեռնվածության ռեժիմների, ինչպես նաև նույն միջավայրերում հարթ և կլորացմամբ, բայց պոլիմերային ծածկույթով պատված փորձանմուշների փորձարկումները տարբեր բեռնվածության ռեժիմների

դեպքերում՝ (Гл4-Гл1), (Гл5-Гл1), (Гл6-Гл1), (ГП2-Гл1) - pH , $(pH, \tau/\sigma_1)$, $(pH, \tau/\sigma_2)$, $(pH, \tau/\sigma, \alpha_\sigma, \Pi)$ (նկ. 1),

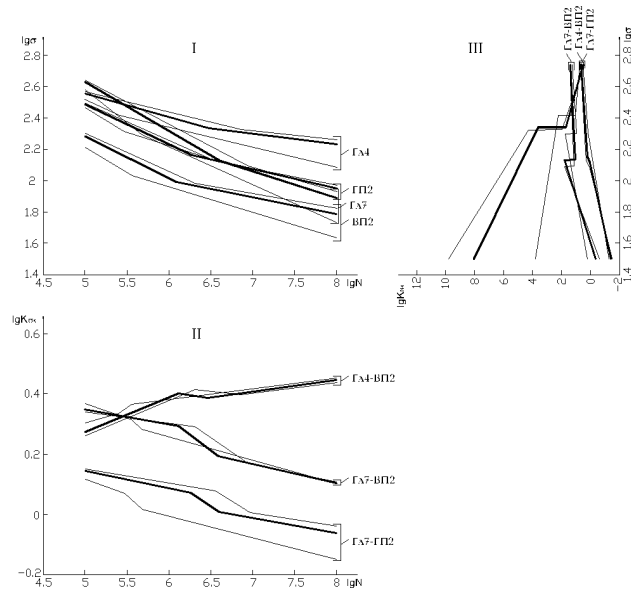


Նկ. 1. (Гл4-Гл1), (Гл5-Гл1), (Гл6-Гл1) և (ГП2-Гл1) համեմատական փորձարկումների նումդրամները: Քվանտիլային գծերի ընտանիքները՝ I - հոգնածային փորձարկումների, II, III - $K_{\sigma k} = f_4(N, z_p)$ և $K_{Nk} = \phi_4(\sigma, z_p)$ ֆունկցիաների համար: Գծերը համապատասխանում են $P(N) = 10, 50$ և $99,9\%$ հավանականությունների մակարդակներին

բ) փորձարկումների CC դասի համար՝ երեք գործոնների համատեղ ազդեցությունը, երբ համեմատվում են տարբեր կոռոզիոն միջավայրերում և լարումների կուտակիչների համար նույն պաշտպանիչ ծածկույթի կիրառումը, pH , α_σ , Π ՝ (Гл7-БП2), (Гл7-ГП2), իսկ նույն կոռոզիոն միջավայրում բեռնվածության ռեժիմները, լարումների կուտակումը և պաշտպանիչ ծածկույթի կիրառումը, τ/σ , α_σ , Π ՝ (Гл4-БП2) (նկ. 2):

Նկ. 1, 2-ում դիտարկված դեպքերը թույլ են տալիս եզրակացնել, որ կոռոզիոն հոգնածային դիմադրության գնահատման առաջադրվող մեթոդն ազդող գործոնների ցանկացած զուգորդումների դեպքում հնարավորություն է ընձեռում իրականացնել մեքենամասերի և հանգույցների ցիկլային ամրության և երկարակեցության հավանական գնահատման ընթացակարգեր:

Նշված հաշվեգրաֆիկական ընթացակարգերն ավտոմատացնելու և համալիր գնահատումներ իրականացնելու նպատակով կազմված են հետևյալ հաշվողական ալգորիթմը և ծրագրային ապահովումը:



Նկ.2. (ΓA4-BΠ2), (ΓA7-BΠ2) և (ΓA7-ΓΠ2) համեմատական փորձարկումների նոմոգրամները:
(նշանակումները նույնն են, ինչ նկ. 1-ինը)

Ելման և հետազոտվող գործոնին վերաբերվող համեմատական կոռոզիոն հոգնաձային փորձարկումների երկչափ տվյալների երկու համախմբերի համար ըստ σ -ի ձևավորվում են երկու փոփոխական շարքեր՝ $(\sigma_1, N_1), (\sigma_2, N_2), (\sigma_3, N_3), \dots$,

$(\sigma_i, N_i), \dots, (\sigma_n, N_n)$ $i = \overline{1, n}$ (n -ը փորձարկումների ծավալն է յուրաքանչյուր խմբաքանակում) և այդ տվյալները *MathCad* ստանդարտ ծրագրի օգնությամբ ներկայացվում են $(\lg \sigma - \lg N)$ կոորդինատային համակարգում: Ըստ նախնական գրաֆիկական վերլուծության, ելնելով տվյալների ցրման դաշտերի տեղաբաշխման առանձնահատկություններից, որոշում են հոգնաձային գծերի բեկման կետերի նախնական կոորդինատները՝ $(\lg \sigma_{R(kf)}, \lg N_{G(kf)})$: Տվյալները բաժանում են ձախ և աջ ճյուղերի և ստանում երեք (չորս) ենթախմբեր: Յուրաքանչյուր ճյուղի (ենթախմբի) համար որոշում են հոգնաձային քվանտիլային գծերի հավասարումների վիճակագրական ցուցանիշները [1], իսկ դրանց օգնությամբ՝ ելման և համեմատական հոգնաձային քվանտիլային գծերի $C_{(kf)}, m_{(kf)}, C'_{k(f)}, m'_{k(f)}$ պարամետրերը $P(N) = 0,1, 0,5, 0,9, 0,95, 0,99$ և $0,999$ ($z_p = 1,28, 0, -1,28, -1,64, -2,33, -3,09$) հավանականությունների մակարդակների շարքի համար: Այնուհետև, ձախ և աջ ճյուղերի համար ստացված քվանտիլային գծերի հավասարումների համատեղ լուծումից ճշտվում են այդ գծերի բեկման կետերի կոորդինատները: Ելնելով $N_{G(k)} > N_{G(kf)}$ կամ $N_{G(k)} < N_{G(kf)}$ պայմանից, ավտոմատ ռեժիմով ընտրվում են հաշվարկային սխեմաները և ըստ աղ. 3-ի և (7)-ի

որոշվում $K_{\sigma k(f)} = f_{4(5)}(N, Z_p)$, $K_{Nk(f)} = \varphi_{4(5)}(\sigma, Z_p)$ ֆունկցիաների քվանտիլային գծերի պարամետրերը $P(N)$ -ի մակարդակների նույն շարքի համար:

Ստացված արդյունքները կոռոզիոն հոգնածային դիմադրության հաշվարկներում օգտագործելու նպատակով որոշում են $K_{\sigma k(f)}$, $K_{Nk(f)}$ գործակիցների բնութագրիչ արժեքները $P(N)$ -ի մակարդակների՝ վերը տրված շարքի համար.

ա) $K_{\sigma k(f)}$ -ը՝ $N = 10^5, 5 \cdot 10^5, 10^6, N_{G(k)}, N_{Gk(f)}, 5 \cdot 10^6, 10^7, 5 \cdot 10^7$ և ցիկլերի թվերի դեպքում,

բ) $K_{Nk(f)}$ -ը՝ $\sigma = 1,5\sigma_{R(k)}, 1,25\sigma_{R(k)}, \sigma_{R(k)}, \sigma_{Rk(f)}, 0,75\sigma_{Rk(f)}$ և $0,5\sigma_{Rk(f)}$ լարումների դեպքում:

Հաշվեգրաֆիկական ընթացակարգերի իրականացման արդյունքներով տպվում են.

1) էլման և համեմատական կոռոզիոն փորձարկումների արդյունքների մշակման երկչափ վիճակագրական աղյուսակները, կոռոզիոն հոգնածային քվանտիլային գծերի հավասարումների վիճակագրական ցուցանիշները և պարամետրերը $P(N)$ -ի մակարդակների շարքի համար,

2) ըստ աղ. 2-ի և (7) համակարգի՝ տրվում են $K_{\sigma k(f)} = f_{4(5)}(N, Z_p)$ և $K_{Nk(f)} = \varphi_{4(5)}(\sigma, Z_p)$ ֆունկցիաների քվանտիլային գծերի պարամետրերը, ինչպես նաև $K_{\sigma k(f)}$, $K_{Nk(f)}$ -ի բնութագրիչ արժեքները,

3) նոմոգրամի ընդհանուր տեսքը նշված ֆունկցիաների քվանտիլային գծերի ընտանիքներով:

Նշված ալգորիթմով ստեղծված SMMA հաշվողական ծրագիրը (46 կԲթ) [3] ընդգրկում է տվյալ աշխատանքում և [2]-ում ներկայացված հաշվեգրաֆիկական ընթացակարգերը, որոնք համալիր կարգով հնարավորություն են ընձեռում իրականացնել պատասխանատու մեքենամասերի և հանգույցների կոռոզիոն հոգնածային դիմադրության հաշվարկային գնահատումներ տարաբնույթ գործոնների առանձին կամ համատեղ ազդեցության կամ էլ որոնողական հետազոտություններում հիմնավորված ցուցանիշների ընտրության դեպքերում:

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. Ստակյան Մ.Գ., Մարգարյան Ա.Գ., Միրաքյան Գ.Գ. Կոռոզիոն հոգնածային դիմադրության գնահատման հաշվեգրաֆիկական մեթոդ // ՀՃԱԼ. – 2005. – Հ2, №. 3. – Էջ 377 – 383:
2. Ստակյան Մ.Գ., Մարգարյան Ա.Գ. Մեքենամասերի կոռոզիոն հոգնածային դիմադրության հավանական գնահատման մեթոդ և ծրագրային ապահովում: **Հաղորդում 1.** Հաշվարկի մեթոդաբանությունը և «օդ-կոռոզիոն միջավայր» համեմատական փորձարկումների հաշվեգրաֆիկական գնահատումը // ՀՃԱԼ. – 2005. – Հ2, №. 4. – Էջ 527-537 / **Հաղորդում 2.** «Կոռոզիոն միջավայր – կոռոզիոն միջավայր» համեմատական փորձարկումների հաշվեգրաֆիկական գնահատումը // ՀՃԱԼ. – 2006. – Հ3, №. 1:

3. Մարգարյան Ա.Գ., Գաբրիելյան Գ.Գ. Համեմատական կոռոզիոն հոգնածային դիմադրության հաշվարկների կազմումը և ծրագրային ապահովումը //Տեղեկատվական տեխնոլոգիաներ, Միջազգ. երիտ. գիտաժող. նյութ. ժող. - Երևան, 2005. - էջ 60-64.

ՀՊՀՀ: Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 15.03.2005:

М.Г. СТАКЯН, А.Г. МАРГАРЯН, М.А. МАНУКЯН

МЕТОДОЛОГИЯ ОЦЕНКИ СОПРОТИВЛЕНИЯ КОРРОЗИОННОЙ УСТАЛОСТИ И АВТОМАТИЗАЦИЯ РАСЧЕТОВ

Для сравнительных испытаний на усталость типов “воздух-коррозионная среда” и “коррозионная среда- коррозионная среда” получены вероятностные функции коэффициентов относительной прочности и долговечности. Разработаны программные средства для получения параметров функций и вероятностных значений этих коэффициентов, а также для построения соответствующей номограммы, с помощью которой простыми графическими процедурами можно получить значения этих коэффициентов.

Ключевые слова: сопротивление коррозионной усталости, семейство квантильных линий, коэффициенты относительной прочности и долговечности, номограмма.

M.G. STAKYAN, A.G. MARGARYAN, M.A. MANUKYAN

METHODOLOGY OF EVALUATION CORROSION FATIGUE RESISTANCE AND AUTOMOTIZATION OF CALCULATION

To compare fatigue tests of “air-corrosion medium” and “corrosion medium-corrosion medium” type, the probability functions of relative strength and durability factors are obtained. The software is developed for obtaining function parameters and probability values of these coefficients, as well as for constructing appropriate nomographs and by means of them it is possible to obtain the values of these coefficients by simple graphical procedures.

Keywords: corrosion resistance fatigue, quantile line family, coefficients of relative strength and durability, nomograph.

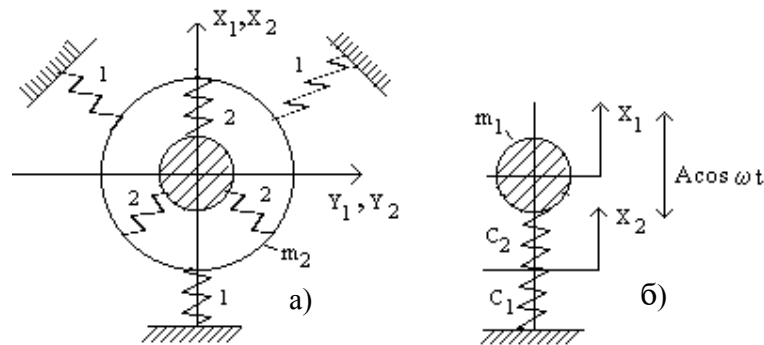
Г.Г. ШЕКЯН, А.П. ХАЛАТЯН, Э.П. ХАЛАТЯН, Р.П. ХАЛАТЯН

СУБГАРМОНИЧЕСКИЙ РЕЗОНАНС В РОТОРНЫХ МАШИНАХ

Рассмотрена возможность возникновения субгармонических резонансов в системе ротор-подшипник качения - упругие подвески. Показано, что при вращении вала на подшипниках качения на упругих подвесках могут возникнуть субгармонические резонансы $1/2$ и $1/3$ порядков, фазовые портреты которых аналогичны фазовому портрету, полученному Т. Хаяси. В этом случае, кроме субгармонических колебаний, могут возникнуть и так называемые комбинационные колебания.

Ключевые слова: субгармонический резонанс, упругий подшипник, характеристика жесткости, коэффициент жесткости, нелинейная жесткость, неуравновешенность ротора, радиальный зазор.

Рассмотрим субгармонические колебания в системе ротор-упругий подшипник (рис.



1).

Рис.1. Расчетная динамическая модель подшипников узла:

а - схема подшипникового узла в линейном упругом поле;

б - динамическая модель ротора с упругим подшипниковым узлом

Упругую характеристику всей опоры представим в виде

$$P(x_1) = C_1 x_1 + C' x_1^3,$$

где $C' = C_1/k$ - малая величина.

Пренебрегая колеблющейся массой опоры M_2 , запишем уравнение колебаний системы в виде

$$M_1 \ddot{x} + C_1 x_1 + C^* x_1^3 = H \cos \omega t. \quad (1)$$

Возмущающее усилие H пропорционально квадрату угловой скорости: $H = M e \omega^2$, где $M e$ - неуравновешенность ротора.

Введем новые переменные: $x_1/\delta = \xi$ (δ - радиальный зазор в подшипнике); $H/M_1 = h$; $C'\delta^2/M_1 = y$; $C_1/M_1 = \omega_0^2$.

Уравнение (1) в безразмерных величинах запишется в виде

$$\ddot{\xi} + \omega_0^2 \xi + \gamma \xi^3 = h \cos \omega t, \quad (2)$$

где ω_0 – собственная частота линейной системы с жесткостью упругого поля C_1 ; γ – малый параметр.

Рассмотрим возможность возбуждения в системе (2) субгармоники порядка 1/2. Предположим, что основная частота субгармонических колебаний в системе со слабой нелинейностью близка к собственной частоте системы ω_0 .

Так как рассматриваются колебания порядка 1/2, то возмущающее усилие (частота вращения ротора) должно быть в два раза выше частоты субгармоники [1].

Решение уравнения (2) будем искать в виде

$$\begin{aligned} \xi &= \xi_0(t) + \gamma \xi_1(t), \\ \omega_1^2 &= \omega_0^2 + \gamma b_1(\lambda_1; \lambda_2). \end{aligned} \quad (3)$$

Подставляя (3) в (2) и пренебрегая членами, содержащими γ в степени выше первой, получим

$$\ddot{\xi}_0 + \gamma \ddot{\xi}_1 + \omega_1^2 \xi_0 + \gamma \omega_1^2 \xi_1 - \gamma b_1 \xi_0 + \gamma \xi_0^3 = h \cos 2\omega_1 t. \quad (4)$$

Порождающее решение найдем из уравнения

$$\ddot{\xi}_0 + \omega_1^2 \xi_0 = h \cos 2\omega_1 t. \quad (5)$$

Тогда

$$\xi_0 = \lambda_1 \cos 2\omega_1 t + \lambda_2 \cos \omega_1 t. \quad (6)$$

В (6) λ_2 – амплитуда субгармонической составляющей, а амплитуду составляющей основной частоты получим после подстановки решения (6) в (5). Приравнявая коэффициенты при $\cos 2\omega_1 t$, получим

$$\lambda_1 = -h / (3\omega_1^2). \quad (7)$$

Порождающее решение (6) соответствует линейной консервативной системе, описываемой уравнением (2) при $\gamma = 0$. При этом первое слагаемое описывает вынужденные колебания, а второе – свободные незатухающие колебания при $\xi = 0$ и $t_0 = 0$.

В линейной системе справедлив принцип суперпозиции, и нет никакого соотношения между частотами обоих колебаний (3). В нелинейной системе при $\gamma = 0$ на частоты колебаний и их амплитуды налагаются определенные ограничения. Поправочный член к решению получим из уравнения (4), выделив члены с малым параметром γ :

$$\ddot{\xi} + \omega_1^2 \xi_1 = b_1 \xi_0 - \xi_0^3. \quad (8)$$

Это уравнение после подстановки в правую часть порождающего решения примет вид

$$\begin{aligned}
\ddot{\xi}_1 + \omega_1^2 \xi_1 = & \left(b_1 - \frac{3}{2} \lambda_1^2 - \frac{3}{4} \lambda_2^2 \right) \lambda_2 \cos \omega_1 t + \\
& + \left(b_1 - \frac{3}{4} \lambda_1^2 - \frac{3}{2} \lambda_2^2 \right) \lambda_1 \cos 2\omega_1 t - \left(\frac{3}{4} \lambda_1^2 - \frac{1}{4} \lambda_2^2 \right) \lambda_2 \cos 3\omega_1 t - \\
& - \frac{3}{4} \lambda_1 \lambda_2^2 - \frac{3}{4} \lambda_1 \lambda_2^2 \cos 4\omega_1 t - \frac{3}{4} \lambda_1^2 \lambda_2 \cos 5\omega_1 t - \frac{1}{4} \lambda_1^3 \cos 6\omega_1 t.
\end{aligned} \quad (9)$$

Решение (9) из-за наличия в правой части слагаемого, включающего собственную частоту системы, имеет вековой член. Однако бесконечный ряд по степеням γ , в котором решение $\xi(t)$ различно, представляет собой ограниченную функцию [2]. Поэтому необходимо исключить вековой член, потребовав, чтобы

$$b_1 = \frac{3}{4} (2\lambda_1 + \lambda_2^2). \quad (10)$$

Подставив (10) в (3), получим

$$\omega_1^2 = \omega_0^2 + \frac{3}{4} \gamma (2\lambda_1^2 + \lambda_2^2).$$

Подставив значение λ_1 , окончательно будем иметь

$$\omega_1^6 - \omega_1^4 \omega_0^2 = \frac{3}{4} \gamma \left(\frac{2}{g} h^2 + \lambda_2^2 \omega_1^4 \right). \quad (11)$$

Уравнение (11) дает искомую зависимость между амплитудой субгармонического колебания и частотой. Возмущающая сила пропорциональна квадрату угловой скорости, т.е. $h = \frac{H}{M_1 \delta} = \frac{e}{\delta} \omega^2 = \varepsilon \omega_1^2$. С учетом этого из (11) получим выражение для амплитуды субгармонической составляющей:

$$\lambda_2 = \omega_0 \sqrt{\left(\Omega_1^2 - 1 - \frac{8}{3} \gamma \frac{\varepsilon^2}{\omega_0^2} \right) \frac{4}{3} \frac{1}{\lambda}}, \quad (12)$$

где $\Omega_1 = \omega_1 / \omega_0$ - относительная частота субгармонических колебаний.

Отсюда найдем минимальную частоту, при которой существуют субгармонические колебания порядка 1/2:

$$\Omega_{\min} = \sqrt{1 + \frac{8}{3} \gamma \frac{\varepsilon^2}{\omega_0^2}}. \quad (13)$$

Из (13) следует, что возможные значения частоты субгармонических колебаний в случае с упругим подшипником немного больше собственной частоты линейной системы и зависят от относительной неуровновешенности ротора $\varepsilon = e / \delta$.

Зависимости амплитуды субгармонических колебаний γ_2 от относительной частоты Ω_1 представлены на рис. 2.

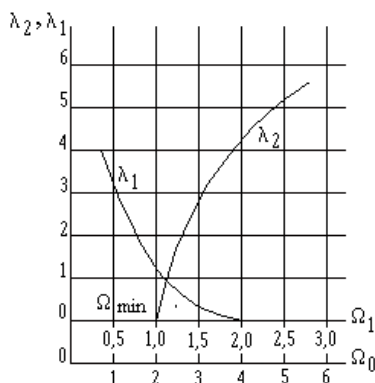


Рис.2. Амплитудно-частотная характеристика субгармонических колебаний порядка 1/2 ротора на упругих подшипниках

Амплитудно-частотная характеристика построена для $\varepsilon = 1$ и $\lambda = \frac{4}{3} \frac{\omega_0^2}{\lambda} = 10$. Здесь же построено изменение амплитуды λ_1 основной частоты. Субгармонические колебания в рассматриваемой системе с упругим подшипником имеют резонансный характер. При этом частота возникновения субгармоники почти совпадает с удвоенной собственной частотой системы ротор-опора. Так же, как и в случае основного резонанса, рост амплитуды при субгармоническом резонансе ограничивается демпфированием, а при достаточно большом сопротивлении – субгармонические колебания вообще не могут существовать [3].

Как следует из уравнения (9), при вычислении поправки первого порядка появляются добавочные составляющие с частотами $3\omega_1$, $4\omega_1$, $5\omega_1$ и $6\omega_1$. При решении эти составляющие были отброшены, поэтому форма колебаний ротора может включать и некоторые из этих частот.

Еще одним вероятным режимом колебаний может быть режим, сопровождающийся субгармоникой порядка 1/3. Зона возбуждения этой субгармоники соответствует скорости вращения $\omega = 3\omega_0$ [4].

При скоростях вращения, равных двойной и тройной собственной частоте ротора на упругих подшипниках, возможно появление субгармонических резонансов. При этом прецессия ротора не является круговой, что особенно важно для установок, требующих прецизионности вращения, у которых зона рабочих скоростей не должна совпадать с указанными частотами.

Субгармонические колебания порядка 1/2 были обнаружены при решении задачи движения вертикального статически и динамически неуравновешенного ротора на упругих подшипниках качения.

За исходную динамическую модель принималась система с радиальным зазором в подшипнике. Жесткостная характеристика представляет собой кусочно-непрерывную функцию радиального перемещения ротора по типу характеристик, рассчитанных для упругого шарикоподшипника.

Субгармонические колебания наблюдались и при моделировании системы с предварительным осевым натягом, причем зона существования субгармоник располагалась за второй критической скоростью как в случае преднатяга, так и в случае зазора (моделировался ротор с двумя упругими опорами). Область существования субгармонических колебаний распространялась до $\omega = 1,8\omega_1$, где ω_1 – первая критическая скорость ротора. Было выделено два вида колебаний – установившееся и неустойчивое.

На рис. 3 приведен график неустойчивого движения для $\omega = 1,65\omega_1$.

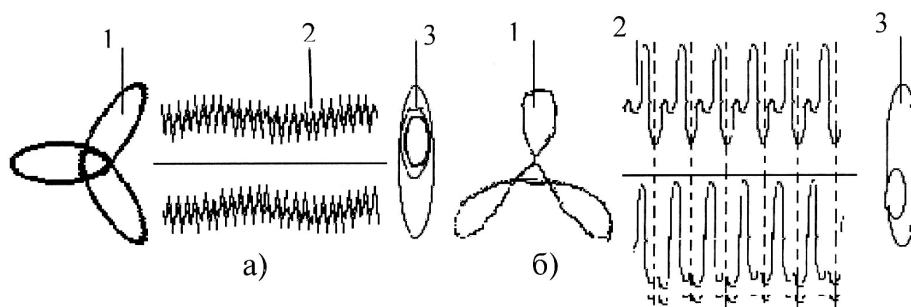


Рис.3. Субгармонические колебания порядка $1/2$ ротора в двух упругих шарикоподшипниках: а – неустойчивый режим колебания, б – установившийся режим

На рис.3 а представлены: 1- траектория движения шипа ротора, полученная на плоскости координат y и z ; 2- осциллограмма колебаний того же типа по двум координатным осям y и z ; 3 - фазовая траектория движения этого же шипа в координатах y и $\dot{y}$, снятая с экрана осциллографа. На рис. 3 б даны те же характеристики на установившемся режиме колебания при $\omega = 1,69\omega_1$.

Отличие заключается в том, что на неустойчивом режиме присутствует некоторая переменная составляющая с малой частотой изменения. Эта частота прецизионного движения ротора равна $(3/2)\omega$.

Следовательно, центр шипа описывает траекторию, показанную на рис. 3 (за два оборота ротора – один общий центр шипа вокруг оси подшипника).

Фазовый портрет системы аналогичен фазовому портрету, полученному аналитически в [2] для системы, описываемой уравнением Дуффинга, как на установившемся, так и на неустойчивом режиме.

В [2] отмечено, что подобная фазовая траектория проходится системой за удвоенный период возмущающей силы, т.е. за два оборота ротора. При

опоре вращения вала на подшипники качения, кроме субгармонических, могут возникнуть и так называемые комбинационные колебания, период которых также связан с нелинейной жесткостью подшипника [4].

Таким образом, получены условия возникновения субгармонических резонансов и комбинационных колебаний. Результаты исследований могут быть использованы при проектировании высокоскоростных роторных машин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Блакер О.** Анализ нелинейных систем. – М.: Мир., 1969.- 400 с.
2. **Хаяси Т.** Нелинейные колебания в физических системах. – М.: Мир, 1968.- 432 с.
3. **Ямомото Т.** О субгармонических и гармонических колебаниях вращающихся валов // Сб. переводов. Механика. - 1963.- ¹ 4.- С.61-73.
4. **Шекян Г.Г.** Динамика роторных машин. – Ереван: Изд. НАН РА “Гитутюн”, 2004.- 329 с.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 17.09.2004.

Հ.Գ. ՇԵԿՅԱՆ, Հ.Պ. ԽԱԼԱԹՅԱՆ, Է.Պ. ԽԱԼԱԹՅԱՆ, Ռ.Պ. ԽԱԼԱԹՅԱՆ

ՍՈՒԲՀԱՐՄՈՆԻԿ ՌԵԶՈՆԱՆՍԸ ՌՈՏՈՐԱՑԻՆ ՄԵՔԵՆԱՆԵՐՈՒՄ

Դիտարկված է ռոտոր-զլորման առանցքակալ-առաձգական կախոց համակարգում սուբհարմոնիկ ռեզոնանսի առաջացման հնարավորությունը: Ցույց է տրված, որ առաձգական հենարանով լիսեռ զլորման առանցքակալների վրա պտտվելիս կարող են առաջանալ 1/2 և 1/3 կարգի սուբհարմոնիկ տատանումներ, որոնց ֆազային նկարագիրը նույնն է, ինչպիսին ստացված է Տ.Խայասու մոտ, ինչպես նաև, այսպես կոչված, համակցված տատանումներ:

Առանցքային բառեր. սուբհարմոնիկ ռեզոնանս, առաձգական առանցքակալ, կոշտության բնութագիր, կոշտության գործակից, ոչ գծային կոշտություն, ռոտորի անհավասարակշռություն, շառավղային բացակ:

**H.G. SHEKYAN, H.P. KHALATYAN, E.P. KHALATYAN,
R.P. KHALATYAN**

SUBHARMONIC RESONANCE IN ROTOR MACHINES

The possibility to energize subharmonic resonances in the system rotor–rolling-bearing-suspensions is considered. It is shown that when the shaft on the rolling bearings on elastic suspensions rotates, the subharmonic resonances of the 1/2 and 1/3 order emerge and their phase portraits are similar to phase portraits obtained by T. Hayasi. In this case besides the subharmonic oscillations the so-called combined oscillations may arise as well.

Keywords: subharmonic resonance, elastic bearing, characteristics of toughness, coefficient of toughness, nonequilibrium of rotors, radial gap.

М.М. СИМОНЯН

К МЕТОДИКЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ СИЛЫ ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА ПРЕРЫВИСТОГО РЕЗАНИЯ

Рассмотрены вопросы, связанные с изучением особенностей прерывистого резания. Приведена методика динамической тарировки динамометра для определения максимальной величины динамической силы переходного периода процесса прерывистого резания с учетом влияния демпфирующей способности инструмента, зависящей как от материала державок, так и от способов крепления твердосплавной пластины.

Ключевые слова: динамометр, тарировка, переходный период, сила резания, удар, твердосплавный инструмент, демпфирующая способность.

При высоких скоростях обработки использование серийных динамометров для исследования изменения силы резания переходного периода процесса прерывистого резания невозможно из-за высокой инерционности их механических систем. Поэтому наиболее приемлемым способом изучения динамической силы резания является использование в качестве чувствительного элемента стержня резца [1].

В момент врезания инструмента в заготовку его консольная часть испытывает нагрузки, регистрацию которых можно произвести наклеенными на державку инструмента чувствительными датчиками с последовательным их включением в одно плечо мостовой схемы.

Динамическая модель такого резца-датчика с одной степенью свободы показана на рис. 1.

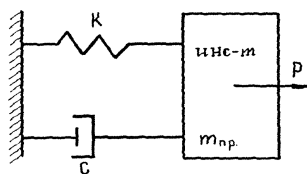


Рис.1. Динамическая модель резца-датчика (динамометра) с одной степенью свободы: K – изгибная жесткость, C – постоянная демпфирования

Статическая тарировка позволяет оценивать лишь упругую составляющую силы резания и не учитывает ее инерционную составляющую и силу вязкого демпфирования, в связи с чем она может быть применена только для определения силы резания установившегося процесса. Потому для определения величины силы удара, возникающей в момент входа инструмента в заготовку (рис.2), динамическую тарировку динамометра необходимо произвести с учетом инерционной составляющей и коэффициента вязкого демпфирования, определяемых экспериментально на специальных образцах.

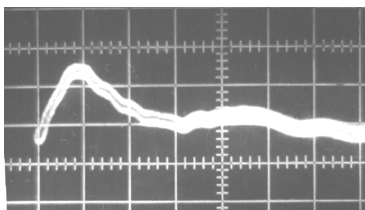


Рис.2. Осциллограмма изменения
силы резания во времени при
прерывистом резании

Исходя из этого, при исследовании переходных процессов прерывистого резания на основе методики тарировки акселерометров и динамометров [2] нами была разработана методика динамической тарировки динамометра, позволяющая учитывать влияние инерционной составляющей и демпфирующей способности инструмента. Тарировку производили при помощи стального шарика массой m_1 , падающего без начальной скорости на рабочую часть инструмента с определенной высоты (рис. 3). Импульс силы P , создаваемый падающим шариком в момент удара о резец, регистрировался на экране запоминающего осциллографа С8-2 (рис. 4).

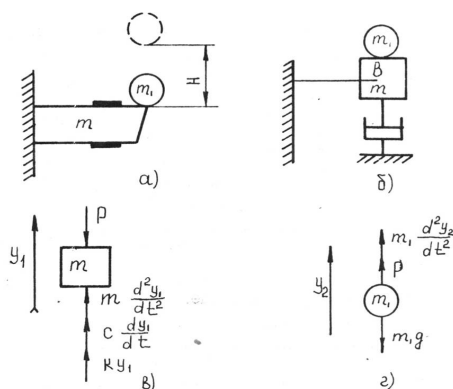


Рис. 3. Схема динамической тарировки
инструмента

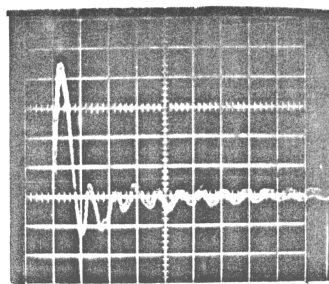


Рис. 4. Тарировочная
осциллограмма динамометра
(резца-датчика). 1 дел. = 25 мкс

Уравнения движения инструмента и шарика могут быть представлены в виде

$$\begin{cases} m \frac{d^2 y_1}{dt^2} + c \frac{dy_1}{dt} + k y_1 = P, \\ m_1 \frac{d^2 y_2}{dt^2} = m_1 g - P, \end{cases} \quad (1)$$

где y_1 и y_2 – смещения масс m и m_1 ; $\frac{d^2 y_1}{dt^2}$, $\frac{d^2 y_2}{dt^2}$ – ускорения масс m и m_1 ; $m \frac{d^2 y_1}{dt^2}$, $m_1 \frac{d^2 y_2}{dt^2}$ – силы инерции; $\frac{dy_1}{dt}$ – скорость массы m ; c –

коэффициент вязкого демпфирования; k – жесткость на изгиб; P – сила ударного взаимодействия.

Величина P определяется по формуле Герца [3]

$$P = \beta \alpha^{3/2} = \beta (y_2 - y_1)^{3/2}, \quad (2)$$

где α – сближение тел; β – коэффициент, зависящий от кривизны поверхностей контактирующих тел и свойств материалов, равный

$$\beta = 4\sqrt{R}/3\eta, \quad (3)$$

R – радиус шара;

$$\eta = (1 - \mu_1^2)/E_1 + (1 - \mu_2^2)/E_2, \quad (4)$$

μ_1, μ_2, E_1, E_2 – соответственно коэффициенты Пуассона и модули упругости материалов инструмента и шарика.

В соответствии с [2] имеем

$$\alpha = y_2 - y_1. \quad (5)$$

На основании (2) – (5) имеем

$$P = \frac{1,33\sqrt{R}}{(1 - \mu_1^2)/E_1 + (1 - \mu_2^2)/E_2} (y_2 - y_1)^{3/2}. \quad (6)$$

Подставляя (6) в систему уравнений (1), получаем

$$\begin{cases} m \frac{d^2 y_1}{dt^2} + C \frac{dy_1}{dt} + ky_1 = \frac{1,33\sqrt{R}}{(1 - \mu_1^2)/E_1 + (1 - \mu_2^2)/E_2} (y_2 - y_1)^{3/2}, \\ m_1 \frac{d^2 y_2}{dt^2} = m_1 g - \frac{1,33\sqrt{R}}{(1 - \mu_1^2)/E_1 + (1 - \mu_2^2)/E_2} (y_2 - y_1)^{3/2}. \end{cases} \quad (7)$$

Изгибная жесткость заземленной консольной балки определяется по формуле [4]

$$k = 3EJ/l^3, \quad (8)$$

где J – момент инерции поперечного сечения державки резца; l – вылет резца.

Для прямоугольного сечения балки получаем

$$k = 0,25 Ebh^3/l^3, \quad (9)$$

где b и h – соответственно ширина и высота сечения корпуса инструмента.

На основании приравнивания собственных частот реального инструмента (балки) $f_{инс}$ и модели f_M приведенная масса модели определяется по формуле

$$m_{np} \approx \rho kl^4/Eh^2, \quad f_M = \sqrt{\frac{1}{m_{np}}} \delta, \quad f_{инс} = \sqrt{\frac{12EJ}{ml^3}} = \frac{1}{l^2} \sqrt{\frac{12EJ}{\rho F}},$$

где $\delta = 1/k$, ρ, F – соответственно податливость, плотность материала и площадь поперечного сечения балки.

Величины коэффициента ζ определялись нами экспериментально на стенде Д-6 в Институте проблем прочности АН Украины, на основании записи виброграмм свободных затухающих колебаний специальных образцов из различных материалов. Форма и размеры образцов приведены на рис. 5 [5].

Значения коэффициентов k и ζ , а также масс m и m_1 для инструмента с напаянной твердосплавной пластиной приведены в таблице.

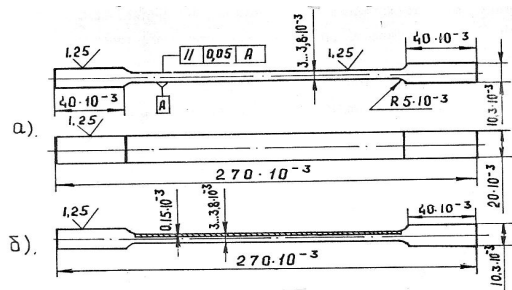


Рис. 5. Формы и размеры образцов из различных материалов:

- а) материалы- сталь 45, ВЧ50-1, СЧ15, СЧ20, СЧ24;
б) материал – сталь 45 с медным покрытием М1

Таблица

Жесткость на изгиб инструмента- k , Н/м	64×10^6
Коэффициент демпфирования инструмента- ζ , Н.с/м	522
Приведенная масса инструмента- $m_{пр}$, Н.с ² /м	$0,46 \times 10^{-1}$
Масса шарика - m_1 , Н.с ² /м	$0,41 \times 10^{-2}$

Начальные условия:

$$y_1=0, y_2=0, dy_1/dt=0, dy_2/dt=\sqrt{2gH}=V_0.$$

Решая систему дифференциальных уравнений (7), находим значения силы удара, скорости и перемещения в зависимости от времени (рис.6). Тарировка производилась путем сравнения пиковых значений расчетной динамической силы (рис.6) и экспериментально определенного перемещения инструмента (рис.4). На основании этого был получен масштаб силы в мВ/Н, позволивший по данным осциллографирования определять величины ударных сил.

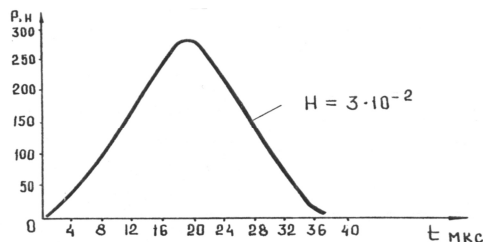


Рис.6. Зависимость динамической силы P от времени

На основании результатов проведенных экспериментов были построены графические зависимости логарифмических декрементов затухания от напряжений, возникающих в образцах из различных материалов (рис. 7).

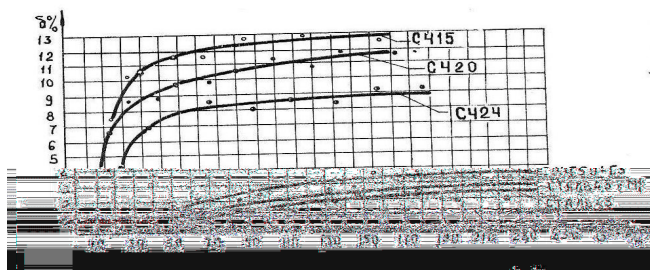


Рис. 7. Графические зависимости
 $\delta = f(\sigma)$

Эксперименты позволили установить, что при одних и тех же напряжениях значения декремента затухания колебаний, а следовательно, и демпфирующая способность у серых чугунов значительно выше, чем у остальных материалов. Сравнение демпфирующих способностей инструментов с различными способами крепления твердосплавных пластин к державке показало, что влияние методов крепления на демпфирующую способность инструмента примерно одинаково, и при применении в качестве корпуса державок серых чугунов это влияние незначительно, и им можно пренебречь [5].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Симонян М.М.** Исследование динамики силового и теплового воздействий на твердосплавный инструмент при прерывистом резании // Вестник машиностроения. - 2004. - №12. - С.54-56.
2. **Верезуб Н.В.** Исследование процесса резания полимерных композиционных материалов алмазными торцовыми фрезами: Дис.... канд.техн.наук. - Харьков, 1979. - 192 с.
3. Инженерные методы исследования ударных процессов / **Г.С. Батуев, Ю.В. Голубков, А.К. Ефремов и др.** - М.: Машиностроение, 1977. - 240 с.
4. **Фесик С.П.** Справочник по сопротивлению материалов. - Киев: Будивельник, 1982. - 279 с.
5. **Симонян М.М., Наджарян М.Е., Посвятенко Э.К.** Об эффективности использования режущих инструментов с чугунными державками // Сверхтвердые материалы. - 1987.- С. 41-44.

Ванадзорский филиал ГИУА.Материал поступил в редакцию 12.02.2005.

Մ.Մ. ՄԻՄՈՆՅԱՆ

ԸՆԴՀԱՆ ԿՏՐՄԱՆ ԱՆՑՈՒՄԱՅԻՆ ԳՈՐԾԸՆԹԱՑՈՒՄ ԴԻՆԱՄԻԿԱԿԱՆ ՈՒԺԻ ՀԵՏԱԶՈՏՄԱՆ
ՄԵԹՈԴԻԿԱՅԻ ՎԵՐԱԲԵՐՑԱԼ

Դիտարկված են ընդհատ կտրման յուրահատկությունների հետ կապված հարցեր և բերված է ուժաչափի չափորոշման մեթոդիկա՝ ընդհատ կտրման գործընթացի անցումային պարբերությունում դինամիկական ուժի առավելագույն մեծության որոշման համար, գործիքի թրթռամարման ունակության հաշվառումով, կախված իրանի նյութից և կարծր համաձուլվածքից պատրաստված թիթեղի ամրացման եղանակից:

Առանցքային բառեր. ուժաչափ, չափորոշում, անցումային շրջան, կտրման ուժ, հարված, կարծր համաձուլվածքային գործիք, հարվածամեղմող ունակություն:

M.M. SIMONYAN

METHODOLOGY OF DYNAMIC FORCE INVESTIGATION IN THE INTERRUPTED CUTTING
TRANSITION PROCESS

The peculiarities of interrupting cutting are observed. Methods of dynamic calibration of torque indicator are given. The transition period of interrupting cutting, which depends on the material of holders and means of sintered-carbide tip fastening is determined.

Keywords: dynamic calibration, transition period, cutting force, stroke, sintered-carbide tool, damping ability.

А.М. СИМОНЯН, Л.В. ПЕТРОСЯН

К ВОПРОСУ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЗАХВАТНЫХ ПРИСПОСОБЛЕНИЙ

Рассматриваются вопросы расчета и выбора основных параметров захватного приспособления в двух вариантах: с фиксируемым положением и с положением, определяемым достижением равновесия. Получены формулы для обеспечения прочности элементов.

Ключевые слова: захватное приспособление, проектирование, серповидный плоский элемент.

Спектр применения универсального захвата весьма велик: строповка конструкций, соединение вантов и транспортных средств, подвеска линий электропередач и т.д.

Основная суть универсального захвата [1] заключается в следующем. Два серповидных плоских элемента вставляются в сквозное отверстие. Затем их взаимное положение фиксируется тем или иным способом, причем отсоединение их от конструкции с отверстием возможно только после освобождения от этого фиксатора.

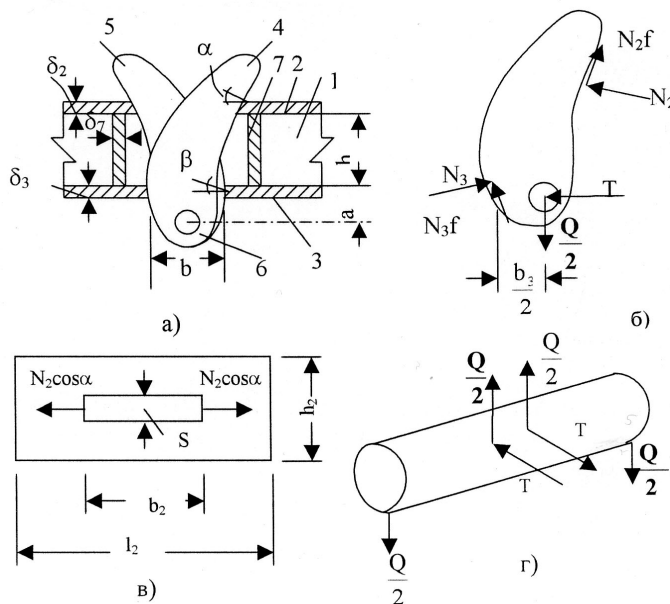


Рис.1

Рассмотрим одну из разновидностей универсального захвата (рис. 1). Положим, что некоторая плоская конструкция 1 имеет сквозные плоские прорезы, в окрестности которых она подкреплена пластинками 2, 3 и 7. В эти прорезы вставляются серповидные элементы 4 и 5, имеющие круглые сквозные проушины. В положении, когда проушины элементов 4 и 5 совмещены, в них вставляется цилиндрический палец 6, при этом имеет место строповка серповидных элементов с конструкцией. На практике палец может быть заменен карабином, что обеспечивает моментальную строповку конструкций.

Рассмотрим расчет этого соединения. Положим, что к элементу 6 приложена сила Q , перпендикулярно направленная к плоскости конструкции 1. Нагрузка передается серповидным элементам, которые проскальзывают вплоть до образования упоров на подкрепляющих пластинах 2 и 3. Углы α и β соответствуют наклонам нормалей поверхностей серповидных элементов к плоскости конструкций. Нагрузка, приходящаяся на элемент 4, естественно, равна $Q/2$.

Уравнения равновесия элемента 4 имеют вид (рис.1б):

$$\begin{aligned}\frac{Q}{2} &= N_2 \sin \alpha + N_2 f \cos \alpha + N_3 \sin \beta + N_3 f \cos \beta, \\ T &= -N_2 \cos \alpha + N_2 f \sin \alpha + N_3 \cos \beta - N_3 f \sin \beta, \\ N_2(h+a) \cos \alpha + N_2 \frac{b_2}{2} \sin \alpha - N_2 f(b+a) \sin \alpha + N_2 f \frac{b_2}{2} - \\ &- N_3 a \cos \beta - N_3 \frac{b_3}{2} \sin \beta + N_3 f a \sin \beta - N_3 f \frac{b_3}{2} \cos \beta = 0,\end{aligned}\quad (1)$$

где N_2 и N_3 – опорные реакции, соответствующие элементам 2 и 3; f – коэффициент трения; T – горизонтальная составляющая усилия, передаваемого от элемента 6.

Решая (1), получим следующие выражения для N_2 , N_3 и T :

$$\begin{aligned}N_2 &= \frac{\frac{Q}{2}}{\sin \alpha + f \cos \alpha + (\sin \beta + f \cos \beta) \frac{(a+h)(\cos \alpha - f \sin \alpha) + \frac{b_2}{2}(\sin \alpha + f \cos \alpha)}{a(\cos \beta - f \sin \beta) + \frac{b_3}{2}(\sin \beta + f \cos \beta)}}, \\ N_3 &= \frac{\frac{Q}{2}}{\sin \beta + f \cos \beta + (\sin \alpha + f \cos \alpha) \frac{a(\cos \beta - f \sin \beta) + \frac{b_3}{2}(\sin \beta + f \cos \beta)}{(a+h)(\cos \alpha - f \sin \alpha) + \frac{b_2}{2}(\sin \alpha + f \cos \alpha)}}, \\ T &= N_2(f \sin \alpha - \cos \alpha) + N_3(\cos \beta - f \sin \beta) .\end{aligned}\quad (2)$$

Из (2) можно заключить, что с уменьшением угла β и коэффициента трения f все усилия увеличиваются, т. е. при пренебрежении трением и принятии $\beta=0$ получим расчет с запасом прочности.

Эти допущения целесообразны также и потому, что угол β , как правило, близок к нулю, а трение зависит от прилегания и состояния контактируемых поверхностей, и учет разгрузки элементов за счет трения не содействует надежности расчета.

При этих допущениях вместо формул (2) получим

$$\begin{aligned} N_2 &= \frac{Q}{2 \sin \alpha}, \\ N_3 &= \frac{Q}{2 \sin \alpha} \left(\frac{a+h}{a} \cos \alpha + \frac{b_2}{2a} \sin \alpha \right), \\ T &= \frac{Q}{2a \sin \alpha} \left(h \cos \alpha + \frac{b_2}{2} \sin \alpha \right). \end{aligned} \quad (3)$$

Наибольший изгибающий момент M , возникающий у серповидного элемента и достигающий в сечении, соответствующем нижнему упору, определится по формуле

$$M = \frac{Q}{2} \left(h \operatorname{ctg} \alpha + \frac{b_2 + b_3 - h_4}{2} \right), \quad (4)$$

где h_4 – ширина элемента 4 в указанном сечении.

Рассматривая серповидный элемент как балку, подвергнутую изгибу и растяжению, получим следующее выражение для расчетного напряжения:

$$\sigma = \frac{3Q}{\delta_4 h_4^3} \left(h \operatorname{ctg} \alpha + \frac{b_2 + b_3 - h_4}{2} \right) + \frac{Q}{2h_4 \delta_4} \leq [\sigma], \quad (5)$$

где δ_4 – толщина серповидного элемента.

Отметим, что напряжения у серповидного элемента уменьшаются с увеличением угла α , при этом они не зависят от размера a .

В точках упора с подкрепляющими пластинами 2 и 3 возможно смятие как серповидного элемента, так и самой пластины. Сминающие напряжения в контакте с пластиной 2 определяются по формуле

$$\sigma_{cm} = \frac{Q}{2\delta_2 \delta_4} \operatorname{ctg} \alpha \leq [\sigma_{cm}], \quad (6)$$

а в контакте с пластиной 3 – по формуле

$$\sigma_{cm} = \frac{Q}{2\delta_3 \delta_4 \sin \alpha} \left(\frac{a+h}{a} \cos \alpha + \frac{b_2}{2a} \sin \alpha \right) \leq [\sigma_{cm}], \quad (7)$$

где δ_2 и δ_3 – соответственно толщины пластин 2 и 3.

Расчет подкрепляющей пластины 2 осуществляется по формулам (рис.1в)

$$\begin{aligned}\tau &= \frac{Q}{2\delta_2(l_2 - b_2)} \operatorname{ctg}\alpha \leq [\tau], \\ \sigma &= \frac{Q}{2(h_2 - s)} \operatorname{ctg}\alpha < [\sigma_p].\end{aligned}\quad (8)$$

Аналогично расчет подкрепляющей пластины 3 осуществляется по формулам

$$\begin{aligned}\sigma &= \frac{Q}{2h_3\delta_3} \left[\left(1 + \frac{h}{a}\right) \operatorname{ctg}\alpha + \frac{b_2}{2a} \right] \leq [\sigma], \\ \tau &= \frac{Q}{2(\ell_3 - b_3)\delta_3} \left[\left(1 + \frac{h}{a}\right) \operatorname{ctg}\alpha + \frac{b_2}{2a} \right] \leq [\tau].\end{aligned}\quad (9)$$

На подкрепляющий элемент 7 приходится сжимающая нагрузка ($\cos(\alpha)$), и, следовательно, будем иметь

$$\sigma = \frac{Q \operatorname{ctg}\alpha}{2\delta_7 b_7} \leq [\sigma], \quad (10)$$

где b_7 – ширина этого элемента.

Палец 6 подвержен действию сил, как показано на рис.1г. В сечении между серповидными элементами действует сдвигающая сила T , следовательно,

$$\tau = \frac{T}{\pi r_6^2} = \frac{Q}{2\pi a r_6^2} (h \operatorname{ctg}\alpha + \frac{b_2}{2}) \leq [\tau], \quad (11)$$

а вне серповидных элементов –

$$\tau = \frac{Q}{2\pi r_6^2} \leq [\tau]. \quad (12)$$

Таким образом, параметры соединения должны быть подобраны так, чтобы удовлетворялись условия прочности (5) – (12).

Отметим, что при проектировании элементов захвата целесообразно делать угол α по возможности большим, а для уменьшения напряжения смятия и разгрузки пальца – увеличить размер a .

В реальных конструкциях, как правило, подкрепляющие пластины не используются, и их функции выполняет сама плоская конструкция ℓ . Однако

при этом возникает опасность того, что нижний упор для захвата (соответствующий подкрепляющей пластине 3) не выдержит сжатия от усилия N_3 , или размер b_3 окажется большим, чем это планируется по расчету. Тогда серповидные элементы могут выскользнуть, не найдя достаточного сопротивления со стороны нижнего упора.

Поэтому на серповидные элементы после их фиксации пальцем 6 может быть надета обойма, выполняющая роль подкрепляющей пластины 3. В этом случае требования к прочности конструкции 1 и к размеру прорези существенно уменьшаются, так как на конструкцию будет действовать лишь усилие N_2 , существенно меньшее, чем N_3 , воспринимаемое обоймой.

Рассмотренный универсальный захват может быть с успехом использован для моментального закрепления линий электропередач к столбам, имеющим отверстия с целью закрепления тросов для буксирования транспортных средств и т.д.

Ниже рассмотрим другую разновидность захвата [2], отличающуюся от вышерассмотренной тем, что фиксация серповидных элементов, как таковая, не осуществляется, а нагрузка прилагается к захвату таким образом, что серповидные элементы могут быть сняты с конструкции лишь после разгрузки.

Это обстоятельство еще упрощает строповку захвата с конструкцией, т.к. устраняется операция фиксации серповидных элементов.

Общая схема такого универсального захвата, называемого крановым, приведена на рис.2. Он состоит из листовых серповидных элементов 2, вставляемых в отверстие конструкции 6 и соединенных друг с другом с помощью шарнира 5. Верхние концы их посредством шарниров 4 соединены с тяговыми элементами 1.

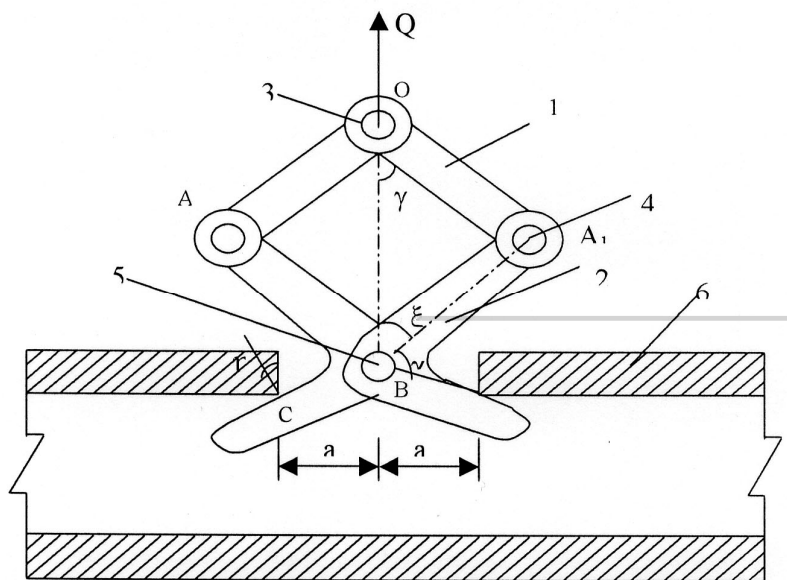


Рис.2

Нагрузка Q на кран передается посредством шарнира 3. Для осуществления строповки точки A и A_1 отодвигаются друг от друга, и нижние торцы серповидных элементов 2 вставляются в отверстие конструкции 6. В процессе приложения к точке 3 усилия Q происходит сближение точек A и A_1 и поворот серповидных элементов вплоть до достижения угла ξ , при котором обеспечивается равновесие захвата.

Положим, что угол между прямой AB и касательной к поверхности серповидного элемента в точке контакта C равен χ , через ℓ , h и δ будем обозначать соответственно длину, ширину и толщину с индексом, указывающим номер элемента (рис.2).

Из геометрических соображений, очевидно, имеем

$$\begin{aligned}\ell_2 \sin \xi &= \ell_1 \sin \gamma, \\ \eta &= \chi + \xi - \frac{\pi}{2}, \quad 0 < \eta < \frac{\pi}{2}.\end{aligned}\tag{13}$$

Пренебрегая трением между поверхностями элементов 2 и 6, получим, что в точке C по нормали к поверхности действует сила $\frac{Q}{2 \cos \eta}$, а на точку A - сила $\frac{Q}{2 \cos \gamma}$, направленная вдоль AO . Принимая, что сумма моментов этих сил относительно точки B равна нулю, получим

$$\frac{Q \ell_2}{2 \cos \gamma} \sin(\xi + \gamma) = \frac{Q a}{2} [1 - \operatorname{tg} \eta \operatorname{ctg}(\xi + \chi)].\tag{14}$$

Подставляя в (14) соотношения (13), получим уравнение для расчета угла ξ , при котором устанавливается равновесие (при пренебрежении трением):

$$\ell_2 \sin \xi + \frac{\ell_2^2 \cos \xi \sin \xi}{\sqrt{\ell_1^2 - \ell_2^2 \sin^2 \xi}} = \frac{a}{\sin^2(\xi + \chi)}.\tag{15}$$

Если уравнение (15) не имеет решений (например, при больших значениях a), то захват может соскользнуть с конструкции; пренебрежение же трением обеспечивает дополнительный запас. При условии $\ell_1 = \ell_2$ уравнение (15) запишется в виде

$$\sin \xi \sin^2 (\xi + \chi) = \frac{a}{\ell} . \quad (16)$$

Отметим, что величина нагрузки Q не влияет на угол равновесия ξ , т.е. при увеличении нагрузки соскальзывание не произойдет, если только будет обеспечена прочность элементов захвата.

Расчет прочности элементов кранового захвата может быть осуществлен аналогично (5)-(12). Для оптимального проектирования следует стремиться к достижению наименьшего значения $\chi + \xi - \frac{\pi}{2}$, которое, тем не менее, удовлетворяло бы условию (15).

Во всех случаях выбор малого значения a , который мог бы быть реализуем из конструктивных соображений, приводит к уменьшению угла ξ согласно (15), что, в свою очередь, приводит к уменьшению напряжений и в элементах 1,3 и 4.

Условие (15) остается необходимым для возможности использования кранового захвата.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крановой захват для изделий со сквозными отверстиями. А.с. СССР. 11 октября 1968. N 233857.
2. Крановый захват. А. с. СССР. 22 октября 1969. N 240973.

Ин-т механики НАН Армении.

Материал поступил в редакцию 12.09.2003.

Ա.Մ. ՄԻՄՈՆԻԱՆ, Լ.Վ. ՊԵՏՐՈՍԻԱՆ

ՀԱՄԱՊԻՏԱՆԻ ԲՈՒՆԴԻ ՕՊՏԻՄԱԼ ԼԱՌԱԳԾՄԱՆ ՀԱՐՑԻ ՄԱՍԻՆ

Դիտարկվում են համապիտանի բռնիչի հաշվարկը և հիմնական պարամետրերի օպտիմալ ընտրությունը: Հարմարանքը կարող է օգտագործվել մետաղական ճոպանների միջոցով բեռների բարձրացման, ինչպես նաև քարշակների միջոցով բեռնափոխադրման նպատակով:

Առանցքային բառեր. նախագծում, բռնիչ, մանգաղաձև հարթ տարր:

A.M. SIMONIAN, L.V. PETROSIAN

ON PROBLEMS OF OPTIMAL UNIVERSAL CLAW PROJECTION

The calculation and choice problems of the general parameters of claw devices are considered. They have two versions with the fixed state and the state developed by achieving equilibrium. Formulas are obtained for providing element strength.

Keywords: claw devices, designing, sickle-like flat element.

С.Г. АГБАЛЯН, Р.С. ЕГИАЗАРЯН

ВЛИЯНИЕ СПОСОБОВ ЗАКАЛКИ НА ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ КОВКИХ ЧУГУНОВ

Исследованы закономерности термической обработки белых чугунов, на основе которых с помощью математического планирования экспериментов выведена зависимость, устанавливающая связь между режимами термоциклической обработки и механическими свойствами получаемого ковкого чугуна. Разработана технология получения высокопрочных ковких чугунов путем термической обработки, которая по сравнению со стандартными чугунами обеспечивает высокие механические свойства.

Ключевые слова: белый чугун, термоциклическая обработка, закалка, отжиг, графитизация, цементит, аустенит, феррит, графит, ковкий чугун.

В программах социально-экономического развития Республики Армения большое внимание уделяется промышленности. Одной из важнейших ее отраслей является машиностроение. В частности, получили распространение металлические материалы, которые наряду с развитием науки и техники подвергаются различным процессам обработки, в результате чего приобретают ранее неизвестные свойства. К числу таких материалов относятся также ковкие чугуны, которые получают путем графитизации белого чугуна, что является диффузионным, продолжительным и затратоемким процессом [1].

Учитывая ускоренный рост объемов применения ковкого чугуна и длительность процесса его получения, возникает необходимость совершенствования и оптимизации технологии получения, особенно режимов термообработки, а следовательно, улучшения химического состава, предварительной термической обработки, оптимизации режимов графитизации, а также изучения методов улучшения литейных, механических и других свойств.

Целью работы является исследование влияния способов предварительной закалки на структуру и свойства ковкого чугуна, а также разработка современной технологии получения высокопрочного ковкого чугуна.

Для достижения указанной цели изучены общепринятые и применяемые технологии зарубежных стран и стран бывшего Союза [2-5]. Исследовано также влияние химического состава на структуру, свойства и отжигаемость чугунов. Особое внимание уделено факторам ускорения продолжительности диффузионного процесса получения ковких чугунов. В качестве таких факторов рассмотрены как термические, так химические и физические способы предварительной обработки белого чугуна. Важное значение придается процессам модификации и перегрева жидкого металла.

Изучен такой фактор ускорения процесса графитизации, как предварительная термическая обработка белого чугуна. Обсуждены различные способы предварительной термической обработки, в том числе

низкотемпературная термическая обработка, закалка, нормализация и т.д., а также их влияние на свойства и процессы получения ковкого чугуна.

Рассмотрены основные принципы структурообразования, кинетика и термодинамика графитизации ковкого чугуна, обсуждены варианты снижения концентрации углерода между графитом и цементитом. В каждом варианте выведена зависимость продолжительности графитизации от соответствующего “слабого звена”.

Опыты показали, что при остывании жидкого белого чугуна до 900°C и его поддержании в этой температуре до 20 час графитизации не наблюдалось, и микроструктура представляла собой белый чугун без следов графита. Этот же чугун после полного остывания до комнатной температуры графитизируется при 900°C в течение 10 час. Это означает, что при остывании белого чугуна до 900°C центров графитизации не образуется, что препятствует графитизации. В процессе дальнейшего остывания эти центры образуются только в том случае, когда чугун проходит критические температуры превращения.

Длительность графитизации сокращается предварительной нормализацией в 1,5 раза, закалкой в масле - в 4...6 раз, а закалкой в воде - в 10...15 раз, что объясняется ростом количества центров графитизации. Ускоренное охлаждение ниже критических температур не увеличивает количество центров графитизации, и, следовательно, не сокращается длительность. Все эти факты свидетельствуют о том, что формирование центров графитизации в белом чугуне происходит при переходе критической температуры с γ - α превращением. При охлаждении белого чугуна, когда происходит быстрый переход критической температуры γ - α превращения, твердый раствор становится сверхнасыщенным, что обусловлено резким снижением растворимости углерода. По этой причине в сверхнасыщенном твердом растворе формируются субмикроскопические центры кристаллизации графита. Количество образовавшихся центров кристаллизации в единице объема чугуна будет настолько большим, насколько высока степень переохлаждения твердого раствора.

Увеличению удельного количества центров графитизации способствуют такие факторы, как: повышение содержания углерода, кремния и подобных элементов в чугуне, которые не растворяются в цементите и не стабилизируют его; рафинирование от газов и модифицирование чугуна; поддержание при ~400°C во время нагрева; быстрая кристаллизация отливки; ускоренный нагрев и рекристаллизация (эвтектоидное превращение, закалка); деформация чугуна и т.д.

Как показывают экспериментальные исследования, процесс графитизации при получении ковкого чугуна можно ускорить путем предварительной закалки белого чугуна. Исследование остаточных напряжений показывает, что при закалке в воде образуется больше напряжений, чем при закалке в масле. Можно заключить, что чем больше скорость переохлаждения во время закалки, тем больше величина остаточных напряжений и, следовательно, больше условия образования центров графитизации.

При графитизации, когда происходят $\text{Ц} \rightarrow \text{А} + \text{Г}$ и $\text{А} \rightarrow \text{Ф} + \text{Г}$ превращения, объем чугуна начинает увеличиваться. Этому способствуют также включения углерода, которые образуются из жидкой фазы и аустенита при охлаждении. Исходя из удельных объемов и количества взаимодействующих фаз, рассчитан рост объема чугуна. Например, при содержании 1%С, согласно реакции $\text{Ц} \rightarrow \text{А} + \text{Г}$, объем чугуна растет на 0,68%, согласно реакции $\text{Ц} \rightarrow \text{Ф} + \text{Г}$ – 0,7%, а согласно реакции $\text{А} \rightarrow \text{Ф} + \text{Г}$ – 0,6...1,0%.

Опыты показывают, что для предотвращения роста объема чугуна его можно легировать, что повысит температуру $\alpha \rightarrow \gamma$ превращения. Можно также поменять форму графита с переходом из компактной формы в графит с точечным междендритным распределением, достижение которого возможно оптимизацией режимов термоциклической обработки чугуна.

Анализ кинетики и механизма реакций вещество-перенос, а также результаты исследования показывают, что при термоциклической обработке на графитизацию влияют следующие величины: n – число термоциклов; v – скорость охлаждения, $^{\circ}\text{C}/\text{с}$; t – температура, $^{\circ}\text{C}$. Проведено математическое моделирование эксперимента, где в качестве исходного параметра выбран предел прочности ковкого чугуна – $\sigma_{\text{в}}$. Для решения уравнения применялся реальный процесс проведения экспериментов типа 2³.

После решения задачи на компьютере определены неизвестные параметры:

$$\sigma_{\text{в}} = e^{1,798} \cdot n^{0,442} \cdot v^{-0,0248} \cdot t^{0,566}.$$

Анализ математической модели показывает, что прочность ковкого чугуна, полученного путем термоциклической обработки, прямо пропорциональна основным параметрам (n , v , t). Как и следовало ожидать, основным фактором, влияющим на механические свойства ковкого чугуна, когда термоциклической обработке подвергается белый чугун, является число термоциклов. Его воздействие увеличивается с повышением температуры и уменьшением скорости охлаждения. На основе полученных результатов выбраны следующие оптимальные режимы получения высокопрочного ковкого чугуна: $n=4...6$, $v=100...200^{\circ}\text{C}/\text{с}$, $t=900...1000^{\circ}\text{C}$. Выбор значений температуры и скорости охлаждения объясняется тем, что конкретно при этих показателях получаются ковкие чугуны с комплексными высокими механическими свойствами.

На основе проведенных комплексных исследований разработана технология получения ковких чугунов (рис.1).

В таблице и на рис. 2 показано влияние ВТТЦО и графитизирующего отжига на механические свойства получаемого ковкого чугуна.

Таблица

Зависимость механических свойств ковкого чугуна от способа обработки

Способ обработки	$\sigma_{\text{в}}, \text{МН}/\text{м}^2$	$\sigma_{\text{т}}, \text{МН}/\text{м}^2$	$\delta, \%$	КС, $\text{Дж}/\text{см}^2$
Графитизирующий отжиг (900°C , 4 ч)	500	450	0,5	20
Графитизирующая ВТТЦО	720	600	4,0	30

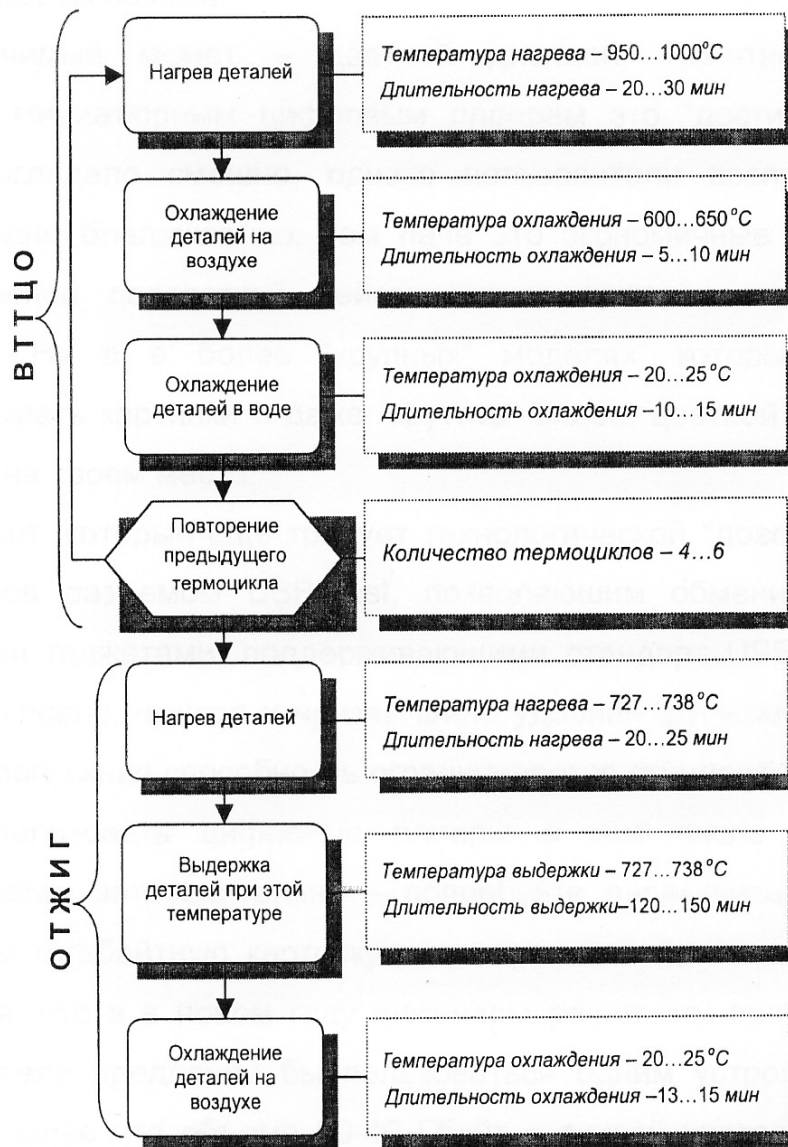


Рис. 1. Технологическая схема получения высокопрочных ковких чугунов

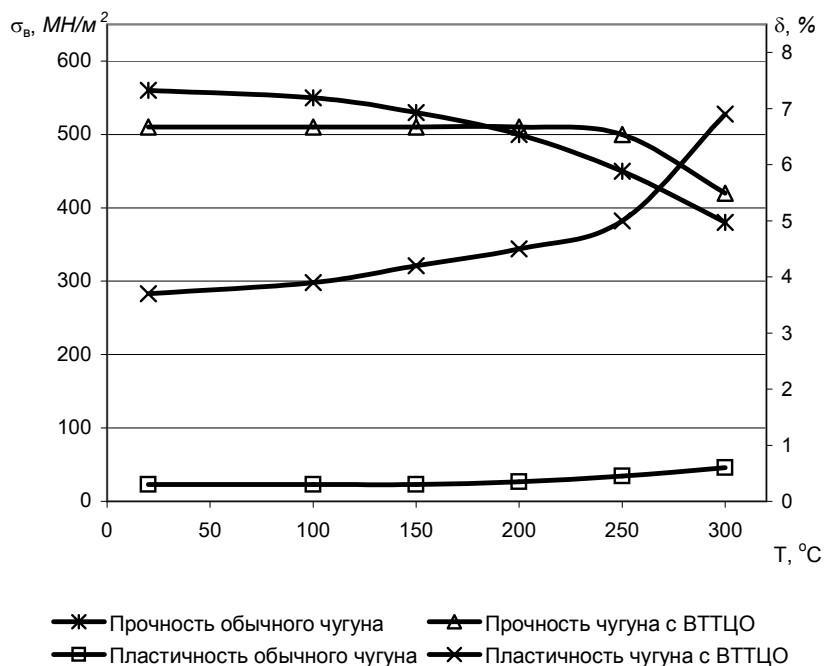


Рис. 2. Зависимость прочности и пластичности чугуна от температуры испытания

Из приведенных данных видно, что применение ВТТЦО вместо традиционного графитизирующего отжига улучшает механические свойства чугуна. В этом случае в условиях производства можно резко сократить технологическое время термической обработки.

Графитизирующая ВТТЦО - кратковременный и технически легко реализуемый процесс (применяется только печной нагрев).

Промышленное внедрение разработанной технологии за счет быстрой графитизации первичного цементита может привести к экономии материалов и повышению качества деталей из ковких чугунов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Хорошев И.И.** Теоретические основы производства ковкого чугуна и графитизированной стали.-Ростов-на-Дону, 1966. – 102 с.
2. **Кунявский М.Н.** Термическая обработка чугуна.-М.: Машгиз, 1950.- 408 с.
3. **Гуляев А.П.** Металловедение.-М.: Металлургия, 1986.-544 с.
4. **Нижненко И.Г.** Графитизация и свойства чугуна.- Киев: Наукова думка, 1989.- 208 с.
5. **Новик Ф.С., Арсов Я.Б.** Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов.-М.: Машиностроение, 1980.-304 с.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 04.11.2004.

Ս.Գ. ԱՂԲԱԼՅԱՆ, Ռ.Ս. ԵՂԻԱԶԱՐՅԱՆ

ՄԽՄԱՆ ԵՂԱՆԱԿՆԵՐԻ ԱԶԴԵՑՈՒԹՅՈՒՆԸ ԿՈՆԼԻԹՈՒՋԵՐԻ ԿԱՌՈՒՑՎԱԾՔԻ ԵՎ
ՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՁԵՎԱՎՈՐՄԱՆ ՎՐԱ

Հետազոտվել են սպիտակ թուջերի ջերմային մշակման օրինաչափությունները, որի արդյունքում փորձի մաթեմատիկական պլանավորման միջոցով դուրս է բերվել թերմոցիկլիկ մշակման ռեժիմների և ստացվող կռելի թուջի մեխանիկական հատկությունների կապը: Մշակվել է բարձրամուր կռելի թուջերի ստացման ջերմային մշակման տեխնոլոգիա, որը, համեմատած ստանդարտ կռելի թուջերի հետ, ապահովում է բարձր մեխանիկական հատկություններ:

Առանցքային բառեր. սպիտակ թուջ, թերմոցիկլիկ մշակում, մխում, թրծում, գրաֆիտացում, ցեմենտիտ, աուստենիտ, ֆերիտ, գրաֆիտ, կռելի թուջ:

S.G. AGHBALYAN, R.S. YEGHIAZARYAN

HARDENING METHOD INFLUENCE ON SHAPING THE STRUCTURE
AND CHARACTERISTICS FOR FORGING CAST IRON

White cast iron thermal processing regularities are studied. By means of mathematical planning of experiments, the dependence setting on the relationship between thermocyclic processes and mechanical characteristics of the forged cast iron to be obtained is defined. The technology for obtaining high-test forging cast iron by thermal processing is developed. Compared with the standard forging cast iron it provides with high mechanical characteristics.

Keywords: white cast iron, thermocyclic processing, hardening, graphitization, cementite, austenite, ferrite, graphite, forging cast iron.

А.О. ТОНОЯН, М.Г. ПОГОСЯН, А.З. ВАРДЕРЕСЯН,
С.П. ДАВТЯН

КИНЕТИКА АДИАБАТИЧЕСКОЙ АНИОННОЙ АКТИВИРОВАННОЙ ПОЛИМЕРИЗАЦИИ ϵ - КАПРОЛАКТАМА. ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССА ПОЛИМЕРИЗАЦИИ

Исследована кинетика адиабатической анионной активированной полимеризации ϵ -капролактама. На основе анализа кинетических кривых адиабатической полимеризации ϵ -капролактама предложено кинетическое уравнение для адиабатической анионной активированной полимеризации ϵ -капролактама, которое с достаточной точностью описывает процесс адиабатической полимеризации.

Ключевые слова: адиабатическая анионная активированная полимеризация, ϵ -капролактамы.

1. Введение. Анионная активированная полимеризация лактамов (ААПЛ) открывает широкие возможности для получения конструкционных крупногабаритных изделий методами “химического формования”. Однако кажущаяся на первый взгляд простая технологическая схема “мономер-изделие” в случае ААПЛ таит в себе немалые проблемы.

Эти проблемы, с одной стороны, связаны со сложностью самого процесса полимеризации и, вследствие этого, с отсутствием соответствующего кинетического уравнения для его описания, а с другой - с саморазогревом реакционной смеси из-за экзотермической полимеризации и кристаллизации образовавшегося полимера.

Несмотря на то, что тепловой эффект полимеризации, например, в случае полимеризации ϵ -капролактама составляет всего $13,4 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}$, адиабатический разогрев мономер-полимерной смеси может достичь $90...92^\circ\text{C}$. При этом одновременно с полимеризацией протекает экзотермическая кристаллизация образующегося полимера с тепловым эффектом $25 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}$, вносящая свой вклад в повышение температуры реакции.

Исследование кинетики ААПЛ проводилось в адиабатическом [1-6], фронтальном [7-10] и изотермическом [11-16] режимах или в условиях сканирующей калориметрии [17, 18]. Несмотря на большое количество работ, вопросы количественного описания кинетики ААПЛ до сих пор остаются дискуссионными.

Цель данной работы – получение кинетического уравнения для количественного описания процесса полимеризации на основе экспериментальных данных по анионной активированной полимеризации ϵ -капролактама в адиабатическом режиме. При этом к кинетическому уравнению предъявляется следующее основное требование – приемлемое описание экспериментальных данных должно обеспечиваться минимальным числом кинетических параметров для процесса анионной активированной полимеризации ϵ -

капролактама. Развитый в данной работе подход может быть использован для количественного описания процессов блочной ААПЛ и может оказаться эффективным при решении задач оптимального управления для получения крупногабаритных монолитных изделий из полиамидов по методу “химического формования”.

2. Экспериментальная часть. Очистку ε -капролактама осуществляли перегонкой в вакууме ($T_{\text{кип}}=110/(1\text{тор})$), хранили в вакуум-шкафу, $T_{\text{пл}}=68,5...69^\circ$ (лит. данные 68-70 [19]). Катализатор- $\text{Na}-\varepsilon$ - капролактама получали взаимодействием металлического Na с ε -капролактамом и использовали в виде 14%-го раствора соли в ε - капролактаме, запаянного в ампулы. Активатор - N -ацетил-капролактам синтезировали по методике [20] ($T_{\text{кип}}=84^\circ/2\text{тор}$). Полимеризацию (ε -капролактама проводили на адиабатической установке, описанной в работах [4, 21, 22].

3. Результаты экспериментов и их обсуждение.

3.1. Разделение процессов полимеризации и кристаллизации. В условиях аиабатической анионной активированной полимеризации ε -капролактама скорость суммарного повышения температуры реакции складывается из процессов полимеризации и кристаллизации, т. е.

$$c\rho \frac{dT}{dt} = Q_n \frac{dn}{dt} + Q_{kp} \frac{dn_{kp}}{dt}, \quad (1)$$

где c, ρ - теплоемкость и плотность реакционной смеси; T - текущая температура реакционной среды; n, n_{kp} - количество образовавшегося полимера и его кристаллизованная часть; Q_n, Q_{kp} - тепловые эффекты полимеризации и кристаллизации соответственно; t - время.

Начальные условия уравнения (1): $t=0, T=T_0, n=n_{kp}=0$.

В предположении, что c, ρ, Q_n, Q_{kp} не зависят от температуры и глубины превращения [23, 24], из выражения (1) после интегрирования получим

$$T - T_0 = \frac{Q_n}{c\rho} n + \frac{Q_{kp}}{c\rho} n_{kp}, \quad (2)$$

где T_0 - начальная температура реакции.

Глубина превращения (α) и степень кристаллизации (η) могут быть определены через n и n_{kp} следующим образом:

$$\alpha = \frac{M_0 - M}{M_0} = \frac{n}{M_0}; \quad \eta = \frac{n_{kp}}{M_0}. \quad (3)$$

Здесь M_0, M - начальная и текущая концентрации мономера.

С учетом (3) выражение (2) может быть переписано в виде

$$T - T_0 = \frac{Q_n}{c\rho} \alpha M_0 + \frac{Q_{kp}}{c\rho} \eta M_0. \quad (4)$$

В (4) $T = T_n + T_k$, где T_n – адиабатический разогрев за счет полимеризации, а T_k – за счет кристаллизации. Для разделенных во времени

процессов полимеризации и кристаллизации ($T_0 \geq 150^\circ\text{C}$) на участке полимеризации $\beta=0$, следовательно,

$$T = T_n - T_0 = \frac{Q_n M_0}{c_p} \alpha. \quad (4')$$

В предварительных опытах в условиях отдельного протекания полимеризации (ε-капролактама и кристаллизации образующегося поли-(ε-капролактама) было показано, что зависимость (4') выполняется, и с учетом тангенса угла линейной зависимости (рис. 1) уравнение (4') может быть записано в виде $T_n - T_0 = 52\alpha$. Тогда с учетом того, что $Q_n M_0 / c_p = 52$, для теплового эффекта полимеризации получим $Q_n = 13,6 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}$.

Линейная зависимость в координатах уравнения (4'), с другой стороны, свидетельствует о постоянстве величины отношения Q_n / c_p в условиях отдельного протекания процессов полимеризации и кристаллизации. Предположив, что и в случае одновременного протекания полимеризации и кристаллизации величина Q_n / c_p также остается постоянной в ходе превращения, соотношение $T - T_0 = 52\alpha$ использовали для пересчета α в $T - T_0$. По методике, описанной в [4], проводили разделение кинетики процессов полимеризации и кристаллизации. С этой целью полимеризацию проводили в тонкостенных стеклянных ампулах диаметром 10 мм, помещенных в адиабатической ячейке калориметра. Реакцию обрывали быстрым охлаждением полимеризующихся образцов жидким азотом. Количество поли-(ε-капролактама) определяли гравиметрически после 6-часовой экстракции полимеров в воде, и по полученным значениям выхода полимера из выражения (3) определяли глубину полимеризации, т. е. α .

Кривая 1 на рис. 2 представляет собой суммарную кинетическую кривую повышения температуры за счет полимеризации и кристаллизации. На этом же рисунке кривая 2 – кинетика повышения температуры за счет полимеризации, определенная из соотношения $T - T_0 = 52\alpha$ с использованием данных по гравиметрии. По разности кривых 1, 2 рис. 2 получали кинетическую кривую адиабатической кристаллизации (кривая 3, рис. 2).

Сопоставление выражения (4) с кинетическими кривыми рис. 2 показывает, что в координатах $(T - T_0) / \alpha M_0$ от η / α (4) линейная зависимость выполняется (рис. 3). При этом величины η и α из кинетических кривых 2, 3 рис. 2 определяются следующим образом:

¹ При начальных температурах $T < 150^\circ\text{C}$ в адиабатических условиях полимеризация ε-капролактама и кристаллизация поли-(ε-капролактама) протекают параллельно, а при $T \geq 150^\circ\text{C}$ – последовательно [1,2].

$$\alpha = \frac{T_n - T_0}{T_n^\infty - T_0}, \quad \eta = \frac{T_{kp} - T_0}{\frac{Q_n}{Q_{kp}}(T_n^\infty - T_0)},$$

где T_n , T_{kp} - текущие температуры полимеризации и кристаллизации; T_n^∞ - конечная температура адиабатического разогрева за счет полимеризации.

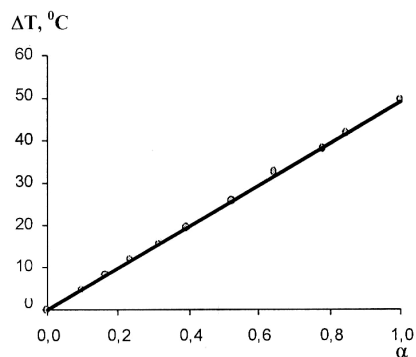


Рис. 1. Зависимость ΔT_n от глубины превращения при анионной активированной полимеризации ϵ -капролактама, $T_0=150^\circ\text{C}$; начальные концентрации катализатора (C_0) и активатора (A_0): $C_0=A_0=3,35 \times 10^{-2} \text{ моль} \cdot \text{л}^{-1}$, $M_0=9,543 \text{ моль} \cdot \text{л}^{-1}$

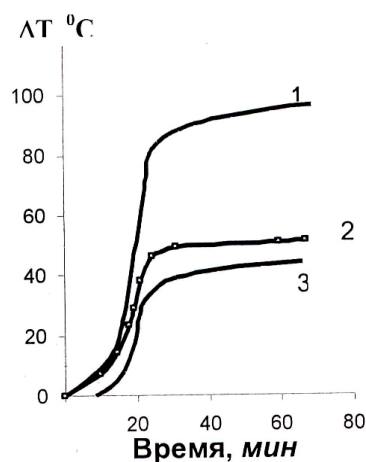


Рис. 2. Кинетика повышения адиабатической температуры при анионной активированной полимеризации ϵ -капролактама: 1 – суммарное повышение, 2 – за счет полимеризации, 3 – за счет кристаллизации. $T_0=125^\circ\text{C}$, $C_0=A_0=3,35 \times 10^{-2} \text{ моль} \cdot \text{л}^{-1}$

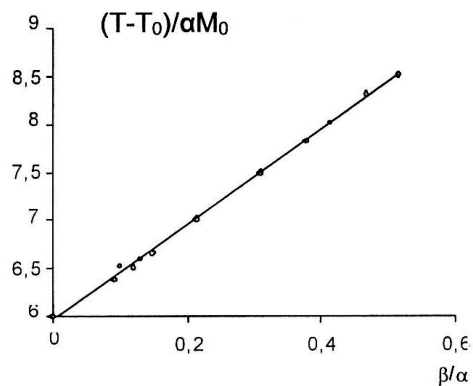


Рис. 3. Зависимость, полученная в координатах уравнения (4). Условия полимеризации те же, что и на рис. 2

Линейная зависимость на рис. 3 подтверждает справедливость допущения о постоянстве величины Q_n/cp в условиях параллельного протекания процессов полимеризации и кристаллизации, причем значения Q_n , определенные из рис. 1 и 3, совпадают. Величина теплового эффекта $Q_{кр}$, определенного из рис. 3, составляет $25,6 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}$.

3.2. Кинетика полимеризации и кристаллизации. Количественное описание кинетики полимеризации. В соответствии с описанной методикой было проведено разделение суммарного повышения температуры на полимеризационную и кристаллизационную составляющие при варьировании начальных условий полимеризации (рис. 4 и 5).

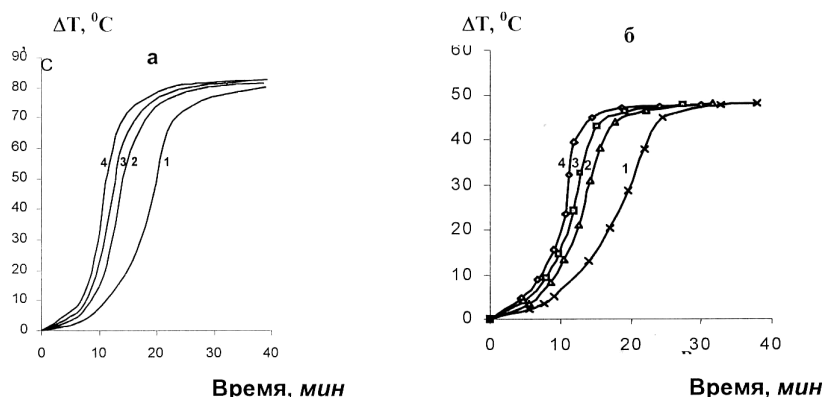


Рис. 4. Кинетические кривые повышения суммарной температуры (а) за счет полимеризации, кристаллизации и кинетика полимеризации (б); $T_0=125^\circ\text{C}$;
 $C_0=3,35 \cdot 10^{-2} \text{ моль} \cdot \text{л}^{-1}$ и $A_0 \cdot 10^{-2} \text{ моль} \cdot \text{л}^{-1}$; 1-3,35; 2-4,78; 3-5,74; 4-6,70

Закономерности кинетики адиабатической полимеризации (-капроактама полностью идентичны закономерностям, полученным нами в изотермических условиях [25]. Поэтому можно полагать, что кинетическое уравнение [25], полученное нами для описания кинетики изотермической полимеризации, может быть использовано и для количественного описания адиабатической полимеризации (-капролактама).

В [25] для описания кинетики изотермической полимеризации нами было получено следующее уравнение:

$$\frac{d\alpha}{dt} = k_{10} \cdot \exp\left(-\frac{E_1}{RT}\right) (1 - \alpha) + k_{20} \cdot \exp\left(-\frac{E_2}{RT}\right) \cdot \alpha \cdot (1 - \alpha) M_0, \quad (5)$$

где $k_1 = k_{10} \cdot \exp\left(-\frac{E_1}{RT}\right)$, $k_2 = k_{20} \cdot \exp\left(-\frac{E_2}{RT}\right)$ - константы скоростей некаталитического и каталитического превращений.

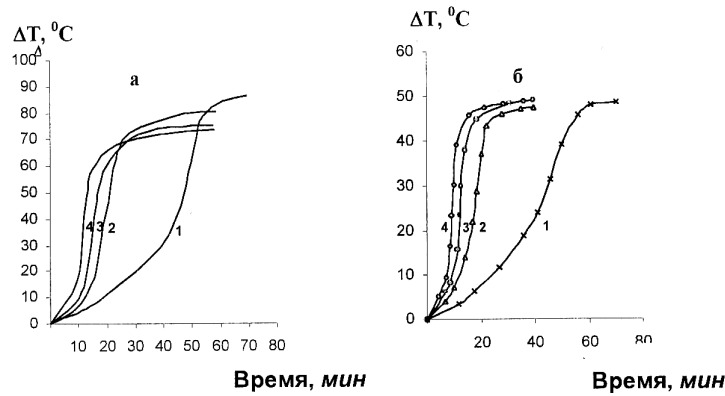


Рис. 5. Кинетические кривые повышения суммарной температуры (а) за счет полимеризации, кристаллизации и кинетика полимеризации (б);
 $A_0=C_0=3,35 \cdot 10^{-2}$ моль·л⁻¹; $T_0, ^\circ\text{C}$: 1-110, 2-125, 3-135, 4-140

Поскольку $K_2 \gg K_1$, то, пренебрегая первым членом, уравнение может быть переписано в виде

$$\frac{d\alpha}{dt} = k_{20} \exp\left(-\frac{E_2}{RT}\right) \cdot \alpha \cdot (1 - \alpha) \cdot M_0. \quad (6)$$

Таким образом, с экспериментальными данными адиабатической полимеризации ϵ -капролактама может быть сопоставлено уравнение (5) или его упрощенная форма (6). Выражение (6) удобнее представить в виде

$$\lg \frac{d\alpha/dt}{\alpha(1-\alpha)} = \lg k_{20} \cdot M_0 - \frac{E_2}{RT}. \quad (6')$$

Рис. 6 является графической иллюстрацией сопоставления уравнения (6) с данными адиабатической термометрии (рис. 4 и 5). Как видно из рисунка, в исследуемом диапазоне изменения начальных температур и концентрации активатора анионная активированная полимеризация ϵ -капролактама удовлетворительно описывается уравнением (6').

Значения эффективной энергии активации (E_2) и предэкспоненциального множителя (K_{20}), рассчитанные из данных рис. 6, составляют, соответственно, 65,5 кДж·моль⁻¹ и $6,9 \cdot 10^4$ л·моль⁻¹ с⁻¹. Уравнением (6') удовлетворительно описываются также и данные [5], полученные в условиях теплообмена с окружающей средой.

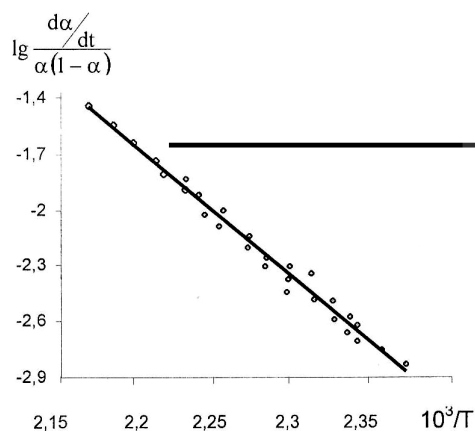


Рис. 6. Линейная зависимость, полученная в координатах уравнения (6),
□ - данные работы [5]

Полученное значение энергии активации хорошо согласуется с данными [12-14], но существенно отличается от значений, полученных в работах [3, 5, 24]. Здесь дело в том, что, в частности, в работе [23] предлагается формально-кинетическое уравнение типа

$$\frac{d\alpha}{dt} = k(1 - \alpha)^n \quad (7)$$

без учета автокатализа. Анализ уравнения (7) и сопоставление его с кинетическими кривыми (рис. 4б, 5б) адиабатической полимеризации ϵ - капролактама, а также с данными [3, 5] показывает, что при значениях $n=1, 2, 3$ расхождение экспериментальных и теоретических кривых составляет более 30%. При этом не наблюдается качественное согласие одной из основных характеристик процесса адиабатической полимеризации – время достижения максимальной скорости реакции, т.е. сходимости точек перегиба экспериментальных и теоретических кривых.

Необходимо также отметить, что уравнение типа (7) было использовано и для описания кинетики адиабатической анионной активированной полимеризации ω - додекалактама в блоке [23]. Анализ этих результатов показывает, что и в данном случае в области максимальной скорости уравнение (7) расходится с экспериментом. Кинетические кривые анионной активированной полимеризации ϵ - капролактама и ω - додекалактама [23] удовлетворительно описываются уравнением (6). При этом определенные значения энергии активации составляют 65-67 кДж·моль⁻¹, 50-52 кДж·моль⁻¹, соответственно, для ϵ - капролактама и ω - додекалактама.

Таким образом, результаты данной работы и анализ литературных данных показывают, что кинетика адиабатической анионной активированной полимеризации лактамов количественно может быть описана уравнением (5) или его упрощенной формой (6).

Необходимо также добавить, что при решении различных технологических задач, связанных с получением монолитных бездефектных изделий из полиамидов по методу “химического формования”, необходимо количественное описание процессов экзотермической кристаллизации в ходе полимеризации, что является предметом наших дальнейших исследований.

Работа выполнена по теме “Разработка новых методов получения полимерных нанокомпозитов, синтез и исследование их свойств”, осуществляемой в рамках целевого финансирования Министерства образования и науки РА.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Wittmer P., Gerrens H.** // Makromol. Chem.- 1965. -Т. 89. - С. 27.
2. **Wichterle O., Tomka J., Šebenda J.** // Collect. Czech. Chem. Commun.-1964. - Т. 29, N 3. - P. 6110.
3. **Malkin A.J., Ivanova S.L., Frolov V.G., Ivanova A.N., Andrianova Z.S.** // Sbornik prednasek “Polyamidy-78”, CSVRS, 1978.- P. 66.
4. **Коршак В.В., Фрунзе Т.М., Давтян С.П., Курашев В.В., Волкова Т.В., Котельникова В.А., Шлейфман Р.Б.** // Высокомолек. соед. - 1979.- Т. 21А, N 9. - С. 1960.
5. **Малкин А.Я., Фролов В.Г., Иванова А.И., Андрианова З.С.** // Высокомолек. соед. – 1979. - Т. 21А, N 3. - С. 632.
6. **Малкин А.Я., Иванова А.И., Иванова С.Л., Андриасова З.С.** // Инж. физ. журн. – 1978. -Т. 34, N 4. - С. 636.
7. **Вольперт В.А., Меграбова И.Н., Давтян С.П., Бегиев В.П.** // Физика горения и взрыва. - 1985. - N 4. - С. 46.
8. **Wittner P., Gerrens G.** Makromolek. Chem. - 1965. - V. 27. - P. 89.
9. **Wichterle O., Tomka J., Šebenda J.** Collect. Czechosl. Chem. Commun. - 1964. - N 29. - P. 610.
10. **Tomka J., Šebenda J., Wichterle O.** Collect. Czechosl. Chem. Commun. - 1966. - N 31. - P. 4341.
11. **Rigo A., Fabbri G., Talamini G.** // J.Polym.Sci.: Polymer Letters. - 1975. -V.13. - P.409.
12. **Greenly R.Z., Stauffer J.C., Kurz J.E.** // Macromolecules. - 1969. - V.2, N 6. - P. 561.
13. **Sittler E., Šebenda J.** // Collect. Czech. Chem. Commun. - 1968. - V.33, N 1. - P.270.
14. **Бегиев В.П., Боглов С.А., Малкин А.Я., Субботина Н.И., Фролов В.Г.** // Высокомолек. соед. - 1980. - Т. 22Б, N 2. - С. 124.
15. **Фрунзе Т.М., Котельников В.А., Волкова Т.В., Курашев В.В., Станкевич И.В.** // Acta Polymerica. - 1981. - V.32, Heft 1. - P.31.
16. **Фрунзе Т.М., Котельников В.А., Иванов М.П., Курашев В.В., Даниловская Л.Б., Давтян С.П., Коршак В.В.** // Докл. АН СССР. - 1981. - Т.260, N 6. - С.1379.
17. **Kargar-Kocsis J., Stafner A.** // Macromol. Chem. - 1978. - V.179, N 3. - P.519.
18. **Kargar-Kocsis J., Kiss L.** // Macromol. Chem. - 1979. - V.180, N 6. - P.1593.
19. **Fabbri G., Talamini G.** // J.Polym.Sci.: Polymer Letters Ed. - 1975. - V.13. - P.469.
20. **Benson R., Cairns T.** // J.Am.Chem.Soc. - 1948. - V.70, N 5. - P. 2115.
21. **Тоноян А.О., Лейкин А.Д., Давтян С.П., Розенберг Б.А., Ениколопан Н.С.** // Высокомолек. соед. - 1973. - Т.15А, N 8. - С. 1847.
22. **Тоноян А.О., Лейкин А.Д., Давтян С.П., Розенберг Б.А., Ениколопан Н.С.** // Высокомолек. соед. - 1974. - Т.16А, N 3. - С. 611.
23. **Малкин А.Я., Иванова С.Л., Карчагина М.А.** // Высокомолек. соед. - 1977. - Т. А19, N 10. - С. 2224.

24. Мержанов А.Г., Абрамов В.Г., Абрамова Л.Т. // Ж. Физической химии. - 1967. - Т.41, N.1. - С. 179.
25. Тоноян А.О., Парикян Э.К., Киракосян Н.Н., Давтян С.П. // Хим. ж. Армении. - 2006 (в печати)

ГИУА. Материал поступил в редакцию 25.06.2005.

Ա.Հ. ՏՈՆՈՅԱՆ, Մ.Հ. ՊՈԴՈՍՅԱՆ, Ա. Զ. ՎԱՐԴԵՐԵՍՅԱՆ,
Ս.Պ. ԴԱՎԹՅԱՆ

ԱԴԻԱԲԱՏ ՊԱՅՄԱՆՆԵՐՈՒՄ ε -ԿԱՊՐՈԼԱԿՏԱՄԻ ԱՆԻՈՆԱՅԻՆ ԱԿՏԻՎԱՅՎԱԾ
ՊՈԼԻՄԵՐԱՑՄԱՆ ԿԻՆԵՏԻԿԱՆ

Ուսումնասիրվել է ադիաբատ պայմաններում ε -կապրոլակտամի անիոնային ակտիվացված պոլիմերացման կինետիկան: ε -կապրոլակտամի ադիաբատ պոլիմերացման կինետիկական կորերի վերլուծության հիման վրա առաջարկվում է ադիաբատ պայմաններում ε -կապրոլակտամի անիոնային ակտիվացված պոլիմերացման կինետիկական հավասարում: Ցույց է տրվում, որ ներկայացված հավասարումը բավարար ճշտությամբ նկարագրում է ադիաբատ պայմաններում ընթացող պոլիմերացման գործընթացը:

Առանցքային բառեր. ադիաբատ անիոնային ակտիվացված պոլիմերացում, ε -կապրոլակտամ, կինետիկական հավասարում:

A. O. TONOYAN, M.H. POGHOSYAN, A. Z. VARDERESYAN,
S. P. DAVTYAN

KINETICS OF ADIABATIC ANION ACTIVATED POLYMERIZATION OF
 ε -CAPROLACTAM

Kinetics of adiabatic anion activated polymerization of ε -caprolactam has been investigated. On the analysis of ε -caprolactam's adiabatic polymerization kinetic curves the kinetic equation of this process has been suggested. It has been shown that the obtained equation describes the process of adiabatic polymerization with the sufficient accuracy.

Keywords: adiabatic anion activated polymerization, ε -caprolactam.

Հ.Ս. ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ, Գ.Ա. ԹՈՒՄԱՆՅԱՆ, Է.Գ. ՀԱՄԲԱՐՁՈՒՄՅԱՆ

**ՖԵՐՈՍՈԼԻԲԴԵՆԻ ՀԻՄՔՈՎ ՍՏԱՑՎԱԾ ՓՈՇԵԿՈՍՊՈԶԻՑԻՈՆ ՆՅՈՒԹԵՐԻ
ՀԱԿԱՇՓԱԿԱՆ ՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԸ ԵՎ ԿԱՌՈՒՑՎԱԾՔԱՅԻՆ
ՎԵՐԼՈՒԾՈՒԹՅՈՒՆԸ**

Հետազոտվել են <Fe-Mo> հիմքով հակաշփական նշանակության փոշեկոմպոզիցիոն նյութեր: Հիմքում ունենալով ամրացման պինդ լուծույթային (Fe[Mo], Fe[Cu]) և ինտերմետաղական (FeMo, Fe₂Mo) մեխանիզմները և <Fe-Mo> մայրակին ավելացնելով պինդ յուղիչներ (S, C, MoS₂)՝ ստացվում են չոր շփման պայմաններում աշխատող հակաշփական հատկություններով ($f=0,08...0,1$ և $i=0,025...0,034$ գր/կմ) փոշեկոմպոզիցիոն նյութեր: Տրված են այդ նյութերի ֆիզիկամեխանիկական հատկությունները և միկրոկառուցվածքային վերլուծության արդյունքները:

Առանցքային բառեր. արտամղում, կոմպոզիցիոն նյութ, մեխանիկական և հակաշփական հատկություններ, միկրոկառուցվածքային վերլուծություն, կոնստրուկցիոն նյութ:

Նոր հակաշփական նշանակության առանցքակալային նյութերի մշակումը ժամանակակից տեխնիկայում ունի ժողովրդատնտեսական նշանակություն: Հետազոտություններով պարզվել է, որ կոմպոզիցիոն մետաղակերամիկական նյութերի մեջ պինդ յուղիչների (գրաֆիտ, սուլֆիդներ, սելենիդներ և այլն) ներմուծումը զգալիորեն բարձրացնում է առանցքակալային նյութերի և շինվածքների մաշակայունությունը՝ շահագործման ընթացքում պահպանելով շփվող հանգույցների չափային ճշտությունը: Հայտնի է, որ պինդ յուղիչ պարունակող մեքենամասը կարող է աշխատել սահմանային և չոր շփման պայմաններում, ինչը երաշխավորում է հակաշփական հատկություններով կոմպոզիցիոն նյութերից սահքի ուղղորդիչների և հենարանների, տարբեր նշանակության առանցքակալների (վռաններ և ներդրակներ), միացմատերի և թրթուրավոր ժապավենների, ինչպես նաև ծանր բեռնվածության պայմաններում աշխատող լիսեռների և ատամնանիվների պատրաստումը:

Արդյունաբերության մեջ լայնորեն կիրառվող ծակոտկեն <Fe-C>, <Fe-Mo-C>, <Fe-Cu-C> փոշեհամաձուլվածքների շարքում առավել պակաս են հետազոտված <Fe-Mo> հիմքով փոշեհամաձուլվածքները:

Ծակոտկեն նյութերի դեֆորմացման և ամրացման (կոմպակտավորման) տեսական-փորձական հետազոտությունները հնարավորություն են տալիս մշակել մետաղական փոշենյութերի արտամղման տեխնոլոգիա, որին հատուկ է մամլման եռակալման գործընթացների համակցումը, ինչի արդյունքում ստացվում է անծակոտկեն նյութ:

Այս գործընթացին բնորոշ յուրահատկությունն է նաև արտամղման արդյունաբար զուգորդումը բարձր ջերմաստիճանային ջերմամեխանիկական մշակման (ԲՋՄՄ) և դրան հաջորդող միման ու հետագա արձակման հետ [1]:

Հետազոտման ծրագրում նախատեսվում է ֆերոմոլիբդենի հիմքի վրա արտամղված <Fe-Mo+K> փոշեհամաձուլվածքների հակաշփական և մեխանիկական հատկությունների ուսումնասիրումը մոլիբդենի 5% և K-ի (Cu, C, S, MoS₂) 0,5...2,0% բաղադրության սահմաններում:

Պղնձով լեգիրումը բարձրացնում է առանցքակալի տանող ընդունակությունը (<Fe-Mo-Cu>, <Fe-Cu-C>, PV=7 (*ՄՊաւ/վրկ*)), կոմպոզիցիոն նյութի ջերմահաղորդականությունը, ապահովում եռակալում հեղուկ ֆազի մասնակցությամբ (որն էլ ակտիվացնում է կառուցվածքագոյացման գործընթացը), նվազեցնում մաշումը [1]:

Ծանր բեռնվածության տակ աշխատող առանցքակալների պատրաստման համար օգտակար է նաև 0,5 ...0,8% ածխածնի ներմուծումը:

Հիմքում ունենալով ամրացման պինդ լուծույթային Fe[Mo], Fe[Cu] և ինտերմետաղական (FeMo, Fe₂Mo) մեխանիզմները, <Fe-Mo> մայրակին ավելացնելով պինդ յուղիչներ (S, C, MoS₂) ստացվում է չոր շփման պայմաններում աշխատող հակաշփական նշանակության փոշեկոմպոզիցիոն նյութ [2,3]:

Հետազոտման առանցքում հակաշփական նշանակության հետևյալ փոշեկոմպոզիցիոն նյութերն են՝ ա - Fe+5%Mo+2%Cu+0,5%C+2%MoS₂ բաղադրությամբ արտամղված, բ - նույն բաղադրությամբ ջերմամշակված (*t*_{մխմ}=1050°C, *t*_{արձ}=300°C, *τ*_{պահ}=2ժամ) և գ - Fe+5%Mo+2%Cu+1%S բաղադրությամբ արտամղված (աղ. 1):

Աղյուսակ 1

Փոշեկոմպոզիցիաների էլքային բաղադրությունը, տոկոս

Նմուշ	Կոմպոզիցիոն նյութ	Կոմպոնենտների բաղադրությունը, %					
		Cu	Mo	MoS ₂	S	C	Fe
ա	Fe-Mo-Cu-C-MoS ₂ (արտամղված)	2,0	5,0	2,0		0,5	մնացածը
բ	Fe-Mo-Cu-C-MoS ₂ (մխված)	2,0	5,0	2,0		0,5	
գ	Fe-Mo-Cu-S (արտամղված)	2,0	5,0		1		

Երկաթի հիմքով փոշեհամաձուլվածքների հակաշփական և մեխանիկական հատկությունները բերված են աղ. 2-ում:

Աղյուսակ 2

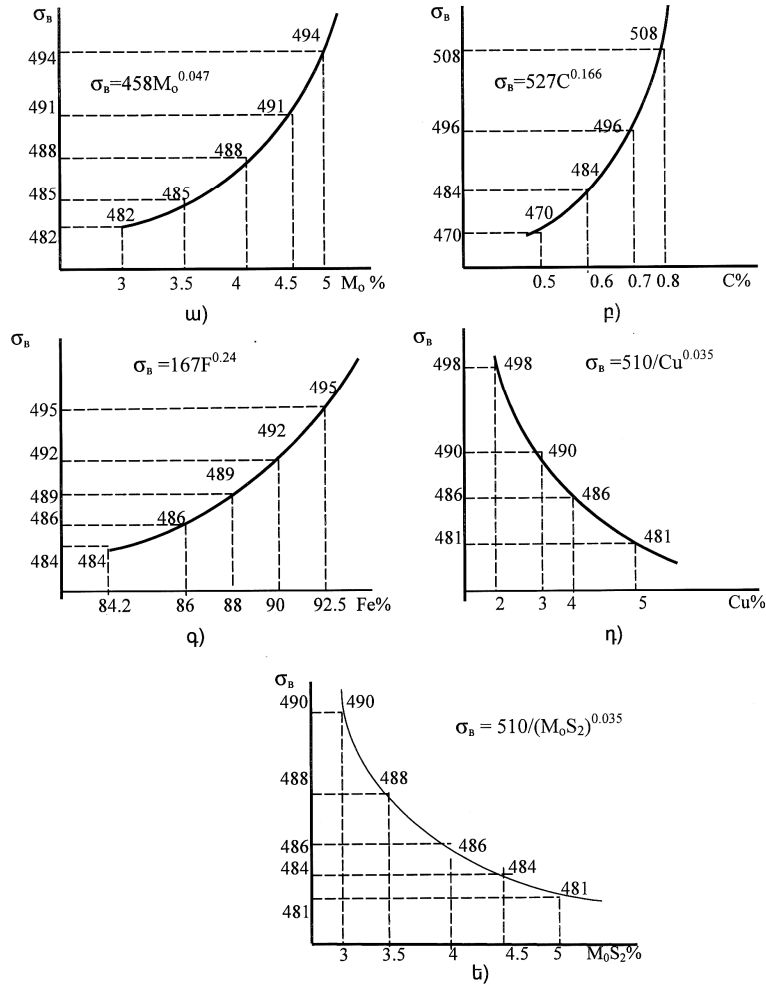
Երկաթի հիմքով փոշեհամաձուլվածքների հակաշփական և մեխանիկական հատկությունները

Նմուշ	Կոմպոզիցիոն նյութ	V=1 մ/վրկ (չոր շփում)		σ_2 , ՄՊա	HB, ՄՊա	KC, կջ/մ ²	λ Վտ / մ.Կ
		P, ՄՊա	f				
ա	Fe-Mo-Cu-C-MoS ₂ (արտամղված)	18	0,09	510	1100	830	35,5
բ	Fe-Mo-Cu-C-MoS ₂ (մխված)	18	0,08	-	1980	550	30,0
գ	Fe-Mo-Cu-S (արտամղված)	14	0,1	440	870	970	46,0

Հիմնական գործոնների ազդեցության աստիճանը արտամղմամբ ստացված համաձուլվածքի ամրային հատկությունների վրա բացահայտվել է փորձի փաստացի 2⁵ տիպի գիտափորձի պլանավորման մեթոդով: Հետազոտվել է պարամետրերի այնպիսի կախվածություն, որի դեպքում ապահովվում է փոշեկոմպոզիցիոն նյութերի առավելագույն ամրություն՝

$$\sigma_B = \frac{182(M_0)^{0,047} \cdot C^{0,166} \cdot Fe^{0,24}}{(Cu)^{0,035} \cdot (MoS_2)^{0,035}} : \quad (1)$$

Նկ. 1-ում բերված են ամրության արժեքների կախումը որոշվող գործոններից: $\sigma_B = f(Mo, C, Fe)$ - ֆունկցիան հիպերբոլիկ աճող է, իսկ $\sigma_B = f(Cu, MoS_2)$ - ֆունկցիան՝ հիպերբոլիկ նվազող:

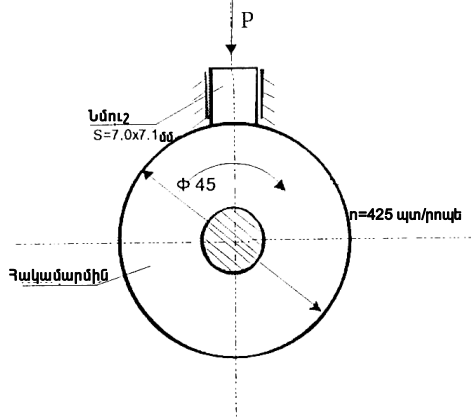


Նկ.1. Կոմպոզիցիոն նյութի ամրության կախումը բաղադրամասերի տոկոսային պարունակությունից (ա-ե)

Ստացված գրաֆիկներից կարելի է որոշել հետազոտվող պարամետրերի այն օպտիմալ արժեքները, որոնց դեպքում ապահովվում են փոշեկոմպոզիցիոն նյութի բարձր մեխանիկական հատկություններ, այն է՝ $Mo(\sim 5\%)$, $C(0,8\%)$; $Cu(2\%)$ և $MoS_2(3\%)$, մնացածը՝ երկաթ:

Նշված բաղադրությամբ կոմպոզիցիոն նյութի մեխանիկական հատկություններն են՝
 $\sigma_B = 510...540 \text{ ՄՊա}$, $HB=1811 \dots 2100 \text{ ՄՊա}$, $KC=800...850 \text{ կՋ/մ}^2$:

Հակաշփական փոշեկոմպոզիցիոն նյութերի փորձարկումները կատարվել են MI-1M սարքի վրա (նկ.2):



Նկ.2. Շփման գործակցի որոշման փորձարկման սխեմա

Փ փորձարկման ռեժիմներն են. շփումը՝ սահքի; սահքի արագությունը – 1 մ/վրկ; տեսակարար ճնշումը – $2...40 \text{ ՄՊա}$; ջերմաստիճանը – սենյակային, շփումը – ինքնայուղում; մշակման ժամանակը – 1 ժամ: Որպես հակամարմին օգտագործվել է պողպատ 45 մակնիշի (45(12 պտտվող հոլովակը (HRC 48-50):

Արտամղման եղանակով փորձանմուշները 1-2 ժամ տևողությամբ $P=2 \text{ ՄՊա}$ բեռնվածության տակ ենթարկվել են նախնական մշակման ($V=1 \text{ մ/վրկ}$):

Որպես նախամշակման ավարտի ցուցանիշ հանդես է գալիս շփման մոմենտի և ջերմաստիճանի փոքրացումը և դրանց հետագա կայունացումը կոնտակտային գոտում:

Շփման գործակիցը հաշվարկվել է

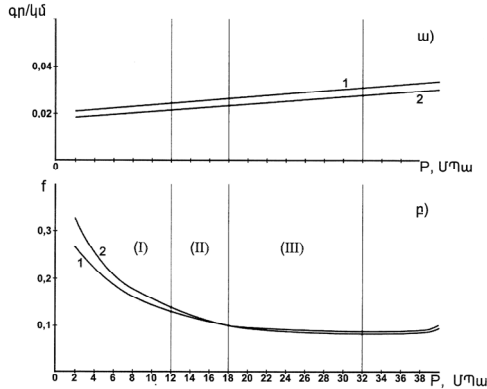
$$\mu = \frac{M_{\text{միջ}}}{P \cdot r}, \quad (2)$$

բանաձևով, որտեղ $M_{\text{միջ}}$ - ը շփման մոմենտի միջին արժեքն է, Ն(մ; P - ն՝ բեռնվածությունը, ՄՊա; r - ը՝ հոլովակի (հակամարմնի) շառավիղը, մ:

Մաշվածությունը որոշվել է կշռային մեթոդով, փորձարկումից առաջ և հետո ստացված կշիռների տարբերությամբ (մեկ կմ անցած շփման ճանապարհի համար: Նկ. 3 ա, բ-ում բերված են մաշման՝ i ($գր/կմ$) և շփման գործակիցների (f) կախումը բեռնվածությունից (P): Այստեղ առանձնացված են երեք բնորոշ տեղամասեր՝ առաջին՝ ինկուբացիոն կամ անցումային, երկրորդ՝ կայուն, որը համապատասխանում է շփման հանգույցի աշխատանքի նորմալ ռեժիմներին և երրորդ՝ մաշող:

Բեռնվածության մեծացումով շփման գործակիցը նվազում է մինչև կայունացված ռեժիմի սկսվելը, որը համապատասխանում է ինկուբացիոն տեղամասին: Շփման գոտու ջերմաստիճանային գործոնի առկայության շնորհիվ, տեքստուրացված պինդ յուղման գործընթացը դառնում է դյուրին՝ հանգեցնելով կայունացված ռեժիմի (II գոտի): Վերջինս բնորոշվում է կայուն շփման գործակցի և

թույլատրելի մաշման արժեքներով, որոնք առկա են՝ ի հաշիվ շփվող մակերեսներում երկրորդային կառուցվածքագոյացման:



Նկ.3. Մաշման (ա) և շփման գործակցի (բ) կախվածությունը բեռնվածությունից ոչ ծակոտկեն նմուշների համար.

1 – Fe+5%Mo+2%Cu+2%MoS₂+0,5%C
(արտամղված)
2 – Fe+5%Mo+2%Cu+2%MoS₂+0,5%C
(մխված)

Շփման գործակցի հետագա աճը և մակերևույթների արագացված մաշը (III գոտի) վկայում է կառուցման գործընթացի ծավալման մասին: Բեռնվածության աճը զարգանում է 2 ՄՊա-ով, իսկ յուրաքանչյուր բեռի համար պահման ժամանակը (մաշման տևողությունը) կազմում է 1 ժամ: Փորձարկման արդյունքները բերված են աղյուսակ 3-ում:

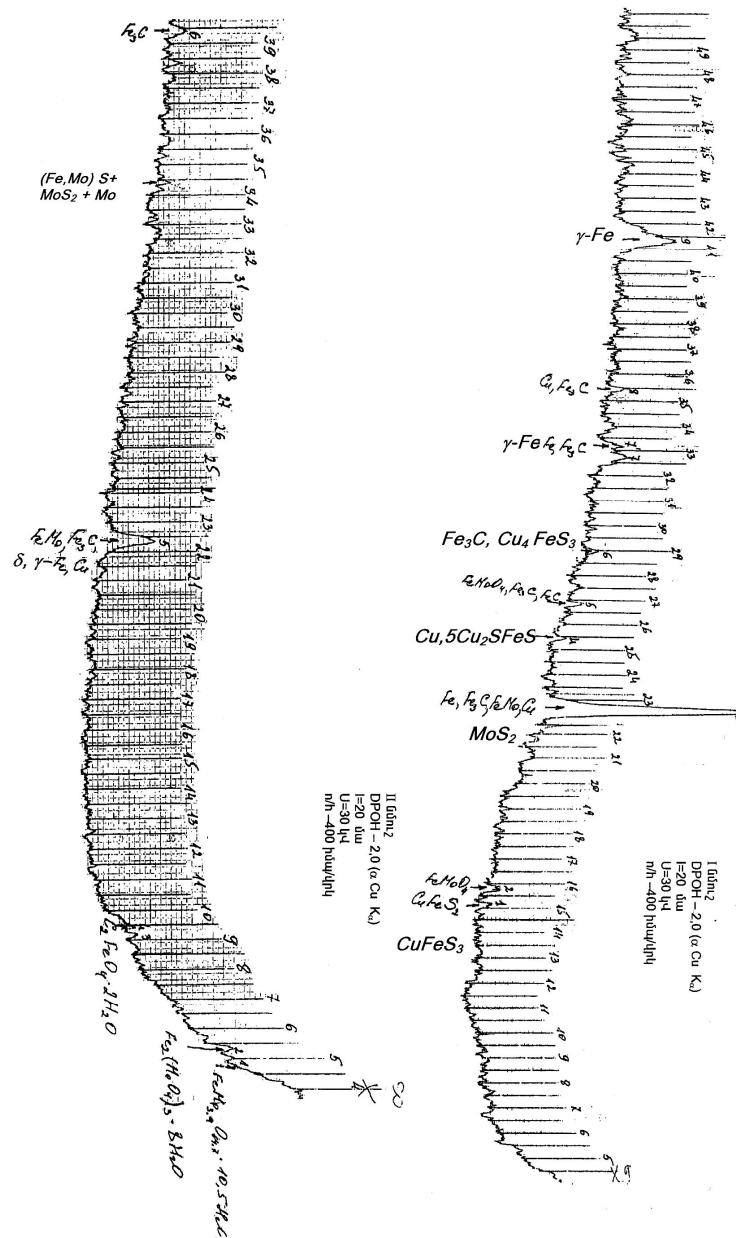
Կոմպոզիցիոն նյութի աշխատանքային օպտիմալ ռեժիմը գտնվում է ճնշման արժեքների $P=18...38$ ՄՊա միջակայքում (նկ. 3), որի ընթացքում շփման գործակցի և մաշման արժեքները չեն գերազանցում $f=0,08...0,1$ և $i=0,025...0,034$ գր/կմ:

Աղյուսակ 3

Փորձարկվող նմուշների քիմիական բաղադրությունը և հակաշփական արդյունքները						
Նյութը (Fe+5%Mo+2%Cu+2%MoS ₂ +0,5%C)	Բեռնվածություն, ՄՊա					
	2,0	8,0	12,0	18,0	32,0	40,0
Արտամղումից հետո	0,27	0,16	0,13	0,10	0,09	0,10
	0,021	0,023	0,024	0,026	0,03	0,034
Մխումից հետո	0,33	0,18	0,14	0,10	0,085	0,095
	0,018	0,02	0,021	0,023	0,027	0,03

* Համարիչում շփման գործակցի արժեքներն են, իսկ հայտարարում՝ մաշումը (գր/կմ):

Հայտնի է, որ շփվող գույգի հակաշփական բնույթի պարամետրերի համար առանձնակի նշանակություն ունեն առաջացած II-ային կառուցվածքների բնույթը և հատկությունները: II-ային կառուցվածքագոյացումը հետևանք է մակերևութային շերտի մեխանաքիմիական լեգիրման (փոխազդեցությունների)՝ ներառյալ շփվող մակերևույթներում նյութերի (օքսիդներ, սուլֆիդներ, կարբիդներ և այլ միացություններ) դիսպերսացումը: Վերջիններս գոյանում են եռակալման բարձր ջերմաստիճաններում և մեծ ճնշումներով շփման պայմաններում, ուր նրանք ձեռք են բերում նոր որակ (բնութագրեր և կառուցվածք), որի հիման վրա կոմպոզիցիոն նյութը ձեռք է բերում բարձր մեխանիկական հատկություններ (աղյուսակ 2), ինչպես օրինակ՝ նյութերի դիսպերս կարծրացման ժամանակ գոյացած II-ային կառուցվածքի դերը ադգեզիոն-դեֆորմացիոն գործընթացների տեղայնացումն է՝ ինչն առաջացնում է սահքի ցածր ամրությամբ բարակ աշխատանքային շերտ (նկ. 4):

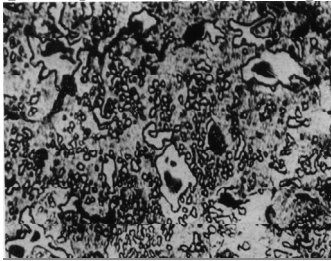


Նկ.4. <Fe-Mo-Cu-MoS₂-C> կոմպոզիցիոն նյութի ռենտգենակառուցվածքային վերլուծություն,
 I նմուշ - կոնտակտային շփման մակերևույթ, II նմուշ - արտամղված
 նյութի հղկված մակերևույթ

Cu-ով և C-ով լրացուցիչ լեգիրումը, ինչպես նաև հետագա ջերմային մշակումներն ապահովում են բարձր հակաշփական հատկություններ (դեֆորմացման $\lambda=3,4$ պայմաններում):

Միտումից հետո ստրուկտուրան մարտենսիտային է, ինչն էլ ապահովում է կոմպոզիցիոն նյութի բարձր մեխանիկական հատկություններ (աղ. 2):

2 կշ.%Cu առկայությունը Fe-Cu-S կոմպոզիցիոն նյութում առաջացնում է FeS և Fe₂S սուլֆիդներ, իսկ 1000 °C և ավելի ջերմաստիճաններում՝ $\gamma - Fe + FeS + Cu_4FeS_3$, որտեղ γ -ն Cu-ի պինդ լուծույթն է երկաթի մեջ Fe[Cu]: Առաջացած միացությունների մեծամասնությունը՝ այդ թվում նաև FeS-ը և Cu₂S-ը միասին առաջացնում են հոմոգեն և անընդհատ պինդ լուծույթներ: Առաջացնում են նաև 5Cu₂S·FeS, 2Cu₃SFeS կամ Cu₄FeS₃ միացություններ [4], սուլֆիդներ, որոնք փոշեկոմպոզիցիոն նյութում ապահովում են բարձր հակաշփական հատկություններ (նկ.5):



Նկ.5. Fe-Cu-C-S կոմպոզիցիոն նյութի միկրոկառուցվածքը թրծումից հետո (X500)

Դիտարկելով Fe-Mo-S եռակի համակարգի դիագրամը [5], համոզվում ենք, որ էվտեկտիկայի բյուրեղացման ջերմաստիճանը $\mathcal{K} \Leftrightarrow \delta-Fe + MoS_x$ 1150(C է: Էվտեկտիդային փոխակերպությունը՝ $\delta-Fe \Leftrightarrow \gamma-Fe + MoS_x$ ընթանում է 1120(C-ում: MoS₂-ի լուծելիությունը δ և $\gamma - Fe$ -ի մեջ մեծ է, իսկ $\alpha - Fe$ -ում չի գերազանցում (ըստ կշռի) 0,5% [6,7]: Համաձուլվածքում գոյացած մոլիբդենի սուլֆիդը՝ MoS_x ($x \approx 1,8$) բյուրեղային կառուցվածքով մոտ է MoS₂-ին, ինչն էլ ապահովում է հետագոտվող փոշեկոմպոզիցիոն նյութի հակաշփական հատկություններ (նկ.3, աղ.2):

Հետագոտություններից պարզվում է, որ մշակված հակաշփական փոշեկոմպոզիցիոն նյութը (ա - բաղադրության) ունի հետևյալ առավելությունները.

- լավ է աշխատում մեծ բեռնվածությունների պայմաններում ($P=18...38$ ՄՊա, $V=1$ մ/վրկ),

- ունի բարձր հակաշփական և մեխանիկական հատկություններ՝ ($f=0,08$ և ցածր մաշվածություն) $\sigma_B \approx 500$ ՄՊա, $HB=1980$ ՄՊա,

- 2% Cu-ի առկայության շնորհիվ ունի լավ ջերմահաղորդականություն՝ $\lambda=46$ Վտ/մ·Կ,

- ենթարկվում է ջերմային մշակման (միտում), բարձրացնելով սեփական ամրությունը և կարծրությունը՝ ($HB=2100$ ՄՊա, $KC=850$ կՋ/մ²) բավարար մածուցիկության պայմաններում:

Հետագոտված փոշեկոմպոզիցիոն նյութերը կարելի է օգտագործել մեծ բեռնվածությունների տակ և չոր շփման պայմաններում աշխատող առանցքակալների պատրաստման համար:

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. **Манукян Н.В.** Порошковая металлургия на пороге 3000-летия. – Ереван: Тигран Мец, 2000. – 205 с.
2. **Woodyatt J.R., Kraus G.** – Met. Trans. – 1979. – V. A10, ¹ 12. – P. 1893 – 1900.
3. **Андреасян М.Г.** Некоторые свойства ферромолибденового порошка и прочностные свойства спеченного изделия // Порошковая металлургия: Труды ЕрПИ. – Ереван, 1971. – Том. 35, вып. 1. – С. 145-151.
4. **Вол А.Е.** Строение и свойства двойных металлокерамических систем. – М.: Наука, 1959. – 1976. – Т.1-3.
5. **Шурин А.К., Киндрачук М.В., Разумова Н.А.** Металлофизика: Респ. межвед. сб.- Киев: Наукова думка, 1978. – ¹ 71. – С. 61-63.
6. **Merwin N.E., Lombard R.H.** Economical Geology. – 1937. – V. 32, ¹ 2. – P.203-284.
7. **Bogitch M.B.** Compt.Rend. Seanc. de L'academie Sei. – 1926. – T.182, ¹ 7. – P. 468-470.
8. **Шурин А.К., Киндрачук М.В., Разумова Н.А.** Металлофизика: Респ. межвед. сб. - Киев: Наукова думка, 1978. – ¹ 71. – С. 61-63.

ՀՊՃՀ. Նյութեր ներկայացվել է խմբագրություն 16.03.2005:

А.С. ПЕТРОСЯН, Г.А. ТУМАНЯН, Э.Г. АМБАРЦУМЯН

АНТИФРИКЦИОННЫЕ СВОЙСТВА И МИКРОСТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ ПОРОШКОВЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ, ПОЛУЧЕННЫХ НА ОСНОВЕ ФЕРРОМОЛИБДЕНОВОЙ МАТРИЦЫ

Рассматриваются вопросы исследования порошковых композиционных материалов на основе <Fe-Mo> антифрикционного назначения. На основе растворного (Fe[Mo], Fe[Cu]) и интерметаллидного (FeMo, Fe₂Mo) механизмов путем добавления твердых смазок (S, C, MoS₂) получены порошковые композиционные материалы антифрикционного назначения ($f=0,08...0,1$ и $i=0,025...0,034$ г/км), работающие в условиях сухого трения. Даны физико-механические свойства и микроструктурный анализ композиционных антифрикционных материалов.

Ключевые слова: экструзия, композиционный материал, антифрикционные и механические свойства, микроструктурный анализ, конструкционный материал.

H.S. PETROSYAN, G.H. TUMANYAN, E.G. HAMBARTSUMYAN

ANTIFRICTION PROPERTIES AND A MICROSTRUCTURAL ANALYSIS OF POWDER COMPOSITE MATERIAL OBTAINED IN THE TERMS OF IRON MATRIX

Problems of studying composite material <Fe-Mo> with antifriction properties are considered. In terms of solution Fe[Mo], Fe[Cu] and intermetallid (FeMo, Fe₂Mo) mechanisms by adding solid lubricants in the matrix <Fe-Mo> powder composite materials with antifriction properties ($f=0,08...0,1$ and $i=0,025...0,034$ g/km) operating in dry friction property conditions are obtained. The physical and mechanical properties and a microstructural analysis of composite antifriction material are given.

Keywords: extrusion, composite material, antifriction and mechanical properties, microstructural analysis, structural material.

Վ.Հ. ՄԱՐՏԻՐՈՍՅԱՆ, Ա. Յու. ՇՄԱՎՈՆՅԱՆ, Մ.Է. ՄԱՍՈՒՆՅԱՆ, Զ.Լ. ԶԱՔԱՐՅԱՆ, Ա.Հ. ԶԻՏԱՆՅԱՆ

ՔՐՈՄԻՏՆԵՐԻ ԱԼՅՈՒՄԻՆԱԹԵՐՄԱՅԻՆ ՎԵՐԱԿԱՆԳՆՄԱՆ ԱՐԱԳՈՒԹՅԱՆ ՎՐԱ ԱԶԴՈՂ ԳՈՐԾՈՆՆԵՐԸ

Քննարկվում են Սևանի Շորժայի հանքավայրի քրոմիտների հարստացումից ստացված խտանյութի անվառարան ալյումինաթերմային վերականգնման գործընթացի արագության վրա ազդող գործոնները՝ ֆեռոքրոմի (Fe-Cr) կամ ֆեխրալի (Fe-Cr-Al) ստացումով:

Առանցքային բառեր. վերականգնում, ալյումինաթերմիա, ֆեռոքրոմ, բովախառնուրդ, քրոմիտ, խտանյութ:

Ժամանակակից տեխնիկական առաջընթացը կապված է կատարելագործված հատկություններով նոր կոնստրուկցիոն նյութերի սինթեզի հետ՝ էներգախնայողական, նյութախնայողական և բնապահպանական տեսակետից պաշտպանված տեխնոլոգիաներով: Այդպիսի նյութերի թվին են պատկանում համաձուլվածքները, որոնք աչքի են ընկնում իրենց բացառիկ բարձր հակակոռոզիոն, հրակայուն և հրադիմացկուն հատկություններով: Աշխատանքում այդ նյութերի ստացման համար որպես հումք է օգտագործվել Սևանի Շորժայի հանքավայրի քրոմիտների հարստացումից ստացված խտանյութը ($53\% \text{Cr}_2\text{O}_3$, $12\% \text{FeO}$):

Քրոմիտային խտանյութի ալյումինաթերմային վերականգնման փորձերը կատարվում են հետևյալ ձևով՝ բովախառնուրդը (10 g), որը պատրաստվում է քրոմիտային խտանյութից, ալյումինային փոշուց և երկաթի օքսիդից, խառնվելուց հետո տեղավորվում է հրակայուն թասի մեջ: Որպես հարուցանյութ օգտագործվում է $\text{Ti} + \text{C}$ խառնուրդը: Այրման հարուցումը կատարվում է շիկացած մետաղալարի միջոցով: Ռեակցիոն խառնուրդի մակերեսային շերտում գրգռվում է քիմիական ռեակցիան, և ձևավորվում է այրման ալիքը, որն արագորեն տարածվում է ամբողջ նմուշի երկարությամբ՝ առաջացնելով ինքնատարածվող բարձրջերմաստիճանային սինթեզ: Այրումը տևում է $12-16 \text{ րոպե}$: Վերականգնման գործընթացում անջատված մեծ քանակությամբ ջերմության հաշվին զարգանում են բարձր ջերմաստիճաններ ($3000...3500^\circ\text{C}$), որը թույլ է տալիս վերականգնումը տանել անվառարան ռեակցիայի ժամանակ անջատված ջերմության հաշվին: Այդ ծայրահեղ պայմաններում բովախառնուրդը կարծես (եռում է), որի հետևանքով երկաթի քրոմիտում պարունակվող երկաթը և քրոմը հալվում և լուծվում են՝ առաջացնելով մետաղական ֆեռոքրոմի գնդիկներ, իսկ քրոմիտային խտանյութում պարունակվող այլ օքսիդները (SiO_2 , Na_2O , CaO), ստացված Al_2O_3 -ի հետ առաջացնում են սիլիկատներ և ալյումինասիլիկատներ խարամի ձևով, որոնք սառչելուց հետո հեշտությամբ պոկվում են ֆեռոքրոմի գնդիկներից:

Ալյումինաթերմային վերականգնման գործընթացի ջերմային հաշվեկշիռը մեծացնելու նպատակով բովախառնուրդին ավելացվել է նաև NaNO_3 , որի հետևանքով ստացվում է արժեքավոր ազոտ պարունակող ֆեռոքրոմ:

Այրման արդյունքում ստացված արգասիքների հետազոտությունը կատարվել է հետևյալ կերպ: Այրումից հետո պատրաստի արգասիքը սառչում է: Սառած

զանգվածը համաձուլվածքի տարբեր չափի գնդիկներ են, որոնք կենտրոնացված են բովախառնուրդների կենտրոնում, և այլումինասիլիկատային զանգված, որը մանրացնելուց հետո ամբողջովին պոկվում է գնդիկներից: Ստացված համաձուլվածքները ենթարկվել են ռենտգենաֆագային, քիմիական և սպեկտրային վերլուծության:

Անվառարան այլումինաթերմային վերականգնման գործընթացի հալման ջերմաստիճանը կախված է գործընթացի արագությունից: Դանդաղ ընթանալու դեպքում ջերմային կորուստները շատանում են, և ընկնում է հալման գործընթացի ջերմաստիճանը, որն իր հերթին համեմատական է հալման տևողությանը [1-3]:

Այլումինաթերմային գործընթացի արագությունը, կախված արտաքին ճնշումից, կարևոր է ոչ միայն գործնական, այլև մեխանիզմի առումով: Սակայն քանի որ երկաթի քրոմիտի այլումինաթերմային վերականգնման ռեակցիայի ստեխեոմետրիկ հավասարման մեջ զագային արգասիքներ չեն մտնում, և ռեակցվող նյութերի ու արգասիքների եռման ջերմաստիճանները շատ բարձր են, կարելի է ենթադրել, որ հիմնական ռեակցիան ընթանում է պինդ փուլում և արտաքին ճնշումից կախված չէ: Ինչպես նշվում է [4,5]-ում, շատ օքսիդների, այդ թվում և երկաթի ու քրոմի օքսիդների այլումինաթերմային վերականգնման ռեակցիայի արագությունը կախված չէ արտաքին ճնշումից: Հետևաբար այլումինաթերմային վերականգնման ռեակցիան ընթանում է առանց զագային նյութերի առաջացման:

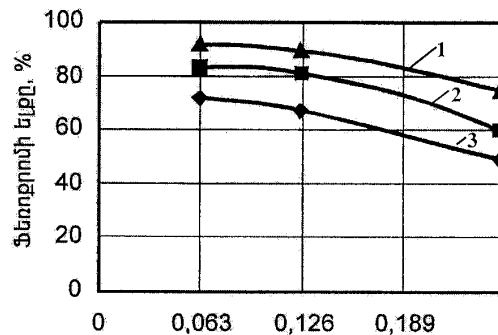
Անվառարան այլումինաթերմային վերականգնման ռեակցիայի արագությունը կախված է բովախառնուրդի և այլումինիումի մանրացման աստիճաններից: Վերականգնման գործընթացում առավելագույն արագություն ապահովելու համար պետք է բովախառնուրդի և վերականգնիչի չափսերն ընտրվեն այնպես, որ բովախառնուրդի ամեն մի տարրական մասնիկ, որը փոխազդեցության մեջ է մտնում այլումինիումի հետ, գտնվի որոշակի քանակական հարաբերության մեջ նրա հետ, և հատիկների ծավալների հարաբերությունը համապատասխանի նրանց մոլ-համարժեքային ծավալներին:

[6-8]-ում փորձնականորեն ապացուցված է, որ այլումինաթերմային վերականգնման գործընթացը առավելագույն արդյունքներ է տալիս բովախառնուրդի և այլումինիումի նույն չափերի դեպքում:

Նկ.1-ից երևում է, որ բովախառնուրդի և այլումինիումի հատիկների չափերի մեծացումը իջեցնում է ֆեռոքրոմի ելքը, քանի որ փոքրանում է փոխազդող նյութերի շփման մակերեսը, և մեծանում են ջերմային կորուստները:

Այսպիսով, այլումինաթերմային վերականգնման ռեակցիաներն ունեն առավելագույն արժեքներ, առավել մանր հատիկների դեպքում, քանի որ այս դեպքում ապահովվում է մասնիկների ամենաէֆեկտիվ խառնումը բովախառնուրդի և այլումինիումի հատիկների միջև շփման մակերեսը առավելագույնն է: Բովախառնուրդի նյութերի մանրացման աստիճանից է կախված այլումինաթերմային հալման գործընթացի արագությունը: Ռեակցիայի արագությունը այստեղ կախված է փուլերի բաժանման մակերեսի մեծությունից, որի պատճառով հատիկների չափերի մեծացումը հանգեցնում է փոխազդող նյութերի տեսակարար մակերեսի փոքրացման, և գործընթացի արագությունն ընկնում է: Հատիկների որոշակի մեծության դեպքում ռեակցիայի հետևանքով անջատված ջերմությունը չի բավարարում բովախառնուրդի հաջորդ բաժնի տաքացմանը և ինքնաբերաբար ընթացքին, և անվառարան վերականգնման գործընթացը դադարում է: Մյուս կողմից՝ բովախառնուրդի նյութերի գերմանրացումը բերում է վերականգնիչի գերայրման և ռեակցվող նյութերի ցրման, իսկ որոշ դեպքերում և պայթման: Բացի

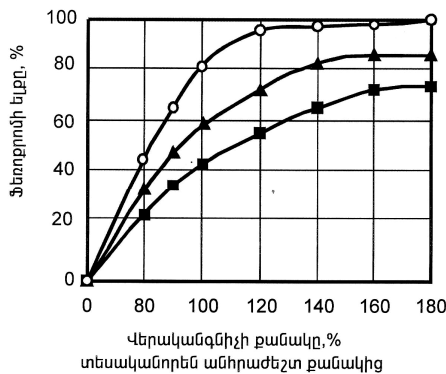
այդ, ինչպես բովախառնուրդի, այնպես էլ ալյումինիումի նուրբ մանրացման ժամանակ մեծանում են նյութերի կորուստները, այդ պատճառով մասնիկների չափերը չպետք է անցնեն $-0,063..-0,125$ մմ-ից:



Նկ.1. Ֆեռոքրոմի ելքի կախումը ալյումինիումի մանրացման աստիճանից բովախառնուրդի տարբեր մանրացման աստիճանի դեպքում՝
1 - $0,063$ մմ, 2 - $0,125$ մմ, 3 - $0,250$

Կարևոր տեխնոլոգիական գործոն է նաև վերականգնիչի քանակի կարգավորման հարցը:

Նկ.2. -ում պատկերված է բովախառնուրդի հալման արագության կախումը վերականգնիչների քանակից ալյումինիումի տարբեր մանրացման աստիճանների դեպքում (բովախառնուրդի մանրացման աստիճանը $-0,063$ մմ):

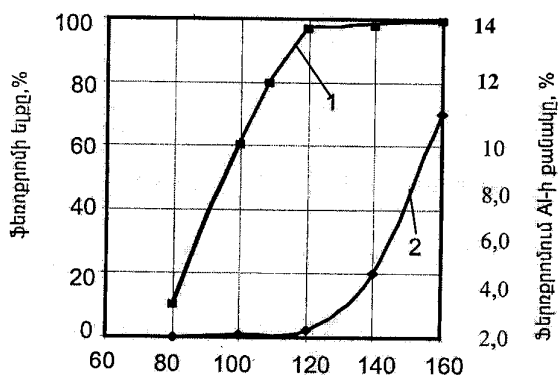


Նկ. 2. Ֆեռոքրոմի ելքի կախումը վերականգնիչի քանակից ալյումինիումի մանրացման տարբեր աստիճանների դեպքում՝
○ $-0,063$ մմ, ▲ $-0,125$ մմ, ■ $-0,500$ մմ

Ֆեռոքրոմի առավելագույն ելքը ստացվում է բովախառնուրդի և վերականգնիչի $0,063$ մմ մանրացման աստիճանի դեպքում:

Վերականգնված ֆեռոքրոմի կորզման աստիճանը, ինչպես նաև դրանում Al-ի պարունակությունը կարող է խիստ փոխվել բովախառնուրդում վերականգնիչի քանակի փոփոխությունից: Որոշակի տիրույթում վերականգնիչի քանակի ավելացումը հանգեցնում է ֆեռոքրոմի ելքի մեծացմանը (նկ.3), այսինքն՝

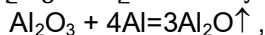
այլումինիումը ծախսվում է հիմնականում վերականգնման ռեակցիայի լիարժեք ընթանալու վրա: Վերականգնիչի 100% պարունակության դեպքում ֆեռոքրոմի ելքը ցածր է և չի անցնում 80% -ից: Լավագույն արդյունքները ստացվում են 120% վերականգնիչի պարունակության դեպքում, ընդ որում ֆեռոքրոմի ելքը հասնում է 98% -ի: Երբ վերականգնիչի քանակը 120%-ից մեծ է, այլումինիումի մի մասն անցնում է հալույթի մեջ, այդ պատճառով այլումինիումի քանակը համաձուլվածքում պետք է սահմանափակվի (նկ.3):



Նկ. 3. Ֆեռոքրոմի ելքի 1 և նրանում Al-ի քանակության 2 կախումը վերականգնիչի քանակից, % տեսական քանակության նկատմամբ

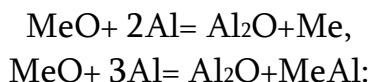
Սակայն այլումինիումի քանակի ավելացումը ֆեռոքրոմում հանգեցնում է նոր տիպի արժեքավոր համաձուլվածքի ստացման Fe-Cr-Al (ֆելխրոլ): Անհրաժեշտության դեպքում այլումինիումի քանակը ֆեռոքրոմում կարելի է հասցնել մինչև 10%:

Բացի այդ, այլումինիումի քանակի ավելացումը բովախառնուրդում հանգեցնում է նաև նրա ցածրագույն օքսիդի առաջացման ըստ հետևյալ ռեակցիայի՝

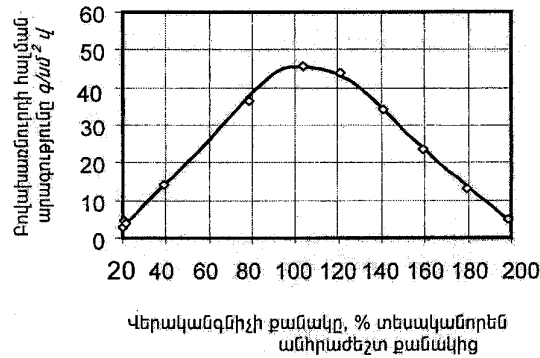


որի դեպքում պատճառով Al -ի ավելցուկի դեպքում այրումը ուղեկցվում է ծխի առաջացումով և այլումինիումի կորստով:

Որոշ դեպքերում Al_2O_3 -ի առաջացումը օգտակար է, քանի որ այն կարող է մասնակցել դժվար վերականգնվող օքսիդների վերականգնման գործընթացին ըստ հետևյալ ռեակցիաների՝



Այլումինիումի քանակի՝ տեսականորեն անհրաժեշտ քանակից ավելացումը (նկ.4) ուղեկցվում է բովախառնուրդի հալման արագության նվազեցմամբ՝ կապված այլումինիումի հալման ջերմային երևույթի մեծացման հետ:



Նկ. 4. Բովախառնուրդի հալման արագության կախումը վերականգնիչի քանակից, բովախառնուրդի և Al –ի 0,063մմ չափերի դեպքում

Այլումինաթերմային հալման գործընթացի արագությունը կախված է նաև հալման պայմաններից, մասնավորապես, խայծի վերին և ներքին դիրքից:

Ներքին խայծով աշխատելիս, ամբողջ հալման ընթացքում է բովախառնուրդը անընդհատ թափվում է հալույթի մակերեսին, և վերականգնման ռեակցիան ընթանում է միայն այն շերտում, որն անմիջականորեն սահմանակից է բովախառնուրդ-հալույթ սահմանագծին:

Խայծի վերին դիրքով աշխատելիս գործընթացը բնութագրվում է վերականգնման ավելի մեծ արագություններով, քանի որ այս դեպքում հալման ժամանակ անջատված բարձր ջերմաստիճան ունեցող մետաղի կաթիլները ծանրության ուժի ազդեցության տակ իջնում են ներքև, շփվում ոչ խիտ բովախառնուրդի հետ և հարուցում են ռեակցիային անհրաժեշտ ջերմություն ավելի ցածր տեղավորված շերտում, և այդպես վերականգնումն ընթանում է մինչև վերջ:

Փորձերի արդյունքները ներկայացված են աղյուսակում, ուր ցույց է տրված մետաղական զանգվածի հալման գործընթացը՝ կախված այլումինիումի հատիկների մեծությունից վերին և ներքին խայծի դեպքում: Երկու դեպքում էլ բովախառնուրդում պարունակվել է 120% տեսականորեն պահանջված քանակի այլումինիում:

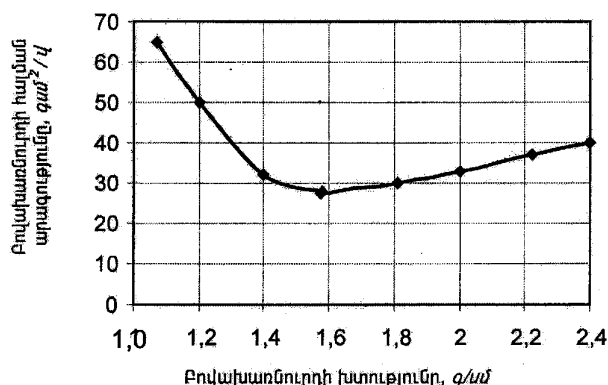
Աղյուսակի տվյալները հաստատում են խայծի վերին դիրքի դեպքում այլումինաթերմային վերականգնման գործընթացի զգալի առավելությունը:

Աղյուսակ

Ֆեռոքրոմի հալման արագությունը ($q/սմ^2$ փ) կախված խայծի տրման եղանակից

Այլումինիումի փոշու մանրացման աստիճանը, մմ	Վերին դիրքով խայծ, $q/սմ^2$ փ	Ներքին դիրքով խայծ $q/սմ^2$ փ
0,75	19	9
0,50	20	12
0,25	22	15
0,125	24	16
0,063	35	19

Վերականգնման գործընթացի արագությունը երկու դեպքում էլ կախված է բովախառնուրդի խտության աստիճանից: Ըստ [8]-ի՝ բովախառնուրդի խտության մեծացման հետ գործընթացի արագությունը նվազում է: Դա բացատրվում է պինդ փուլերի և գազային արգասիքների միջև ջերմափոխանցման ուժգնությամբ, որը փոքրանում է բովախառնուրդի խտացումից, չնայած [6,7]-ում հեղինակները պնդում են, որ մետաղաթերմային հալման գործընթացում գազ չի առաջանում կամ աննշան չափով է առաջանում, և հալման արագությունը համարյա կախված չէ բովախառնուրդի խտությունից:



Նկ.5. Բովախառնուրդի հալման արագության կախումը բովախառնուրդի խտությունից՝
3գ քրոմիտային խտանյութ, 1,5գAl, 1գNaNO₃

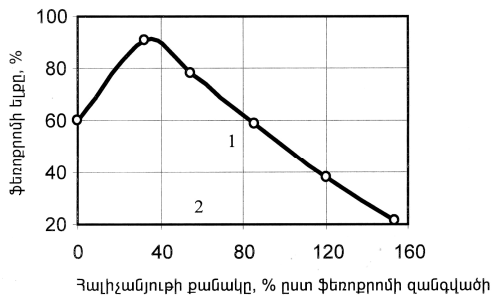
Նկ. 5 -ում պատկերված է բովախառնուրդի հալման արագության կախումը նրա խտությունից:

Ինչպես երևում է, բովախառնուրդի հալման արագությունը սկզբում նվազում է ապա՝ աճում: Առավել հավանական պատճառը արագության կտրուկ նվազման հետ կապված, առաջացած հեղուկ մետաղի դեպի ներքև հոսքի դժվարությունն է, իսկ արագության հետագա աճը՝ 1,68 g/cm^3 խտացումից հետո, շփման պայմանների լավացմամբ՝ կապված է խառնուրդի մեջ եղած օքսիդների և ալյումինիումի փոխազդեցության մասնիկների միջև եղած տարածության փոքրացման հետ: Այդ գործում զգալի դեր ունի ջերմահաղորդականության գործոնը:

Հալիչանյութի (ֆլյուս) ազդեցությունը բովախառնուրդի ալյումինաթերմային հալման արագության վրա որոշվում է նրա տեխնոլոգիական դերով մետաղների օքսիդների ալյումինով վերականգնման գործընթացում: Հալիչանյութի բովախառնուրդի մեջ մտցնելու հիմնական նպատակը որոշակի ֆիզիկաքիմիական բնութագրերով խարամային հալույթի ստացումն է, վերականգնման ռեակցիային զուգահեռ և մետաղական փուլի ու խարամի հնարավորինս լրիվ բաժանման հնարավորության ապահովումը: Որպես հալիչ օգտագործվել է CaO-ն: Իրական ալյումինաթերմային գործընթացներում CaO-ն մտցնելիս վերականգնման ռեակցիան սկզբում չի արագանում, դա ըստ երևույթին հետևանք է այն բանի, որ պինդ CaO-ի մտցնելը բովախառնուրդի մեջ, որի հալման ջերմաստիճանը գերազանցում է գործընթացի ջերմաստիճանին և որի անցումը հալույթի մեջ կապված նրա լուծման հետ բարձր կավահողային խարամի մեջ, ուղեկցվում է ջերմային կորուստներով:

Լուծվելով խարամային հալույթի մեջ, ի հաշիվ ջերմակլանիչ ռեակցիայի, CaO -ն իջեցնում է հալույթի ջերմաստիճանը, հետևաբար նաև՝ բովախառնուրդի հալման արագությունը: Այս երկու գործոնների գոյությունը՝ մետաղի ձուլածոյի ձևավորման պայմանների լավացումը և վերականգնման ռեակցիայի արագության նվազումը, պայմանավորվում են բովախառնուրդում CaO -ի քանակի ընտրությամբ, որը որպես կանոն, չի գերազանցում վերականգնվող օքսիդների զանգվածի 30% -ին:

Նկ. 6 -ում պատկերված է ֆեռոքրոմի ելքի և բովախառնուրդի հալման արագության կախումը հալիչի քանակից:



Նկ.6. Ֆեռոքրոմի ելքի կախումը հալիչանյութի քանակից

Ինչպես երևում է, 30%-ից ավելի CaO -ի ավելացումը հանգեցնում է հալման արագացման և ֆեռոքրոմի ելքի նվազման:

Կինետիկական առումով CaO -ի ավելացումը հանգեցնում է թափոնային ավելցուկի ավելացմանը: Թափոնային ավելցուկը կիրառվում է այն դեպքերում, երբ հարկավոր է իջեցնել գործընթացի արագությունը և հալման ջերմաստիճանը: Պրոցեսի արագությունը բալաստի ավելացումից զծային ձևով նվազում է: Ըստ

որում՝ որքան փոքր է բալաստային խառնուրդի խտությունը, այքան զգալի է նրա ազդեցությունը այլումինաթերմային գործընթացի արագացման վրա:

Բովախառնուրդային նյութերի՝ նախապես տաքացումը հանգեցնում է այլումինաթերմային վերականգնման գործընթացի արագության մեծացմանը՝ կապված ջերմաստիճանի բարձրացման հետ: Թերմիտային խառնուրդների ազդեցությամբ նույն արդյունքն է առաջանում, ինչ և նախապես տաքացումից, սակայն այն դեպքում դրությունը կտրուկ կարող է բարդանալ, եթե թերմիտային խառնուրդում պարունակվում են նյութեր, որոնք ազդում են հալման ընթացքի կամ առաջացած խարամի բաղադրության վրա:

Այսպիսով, փորձարարական հետազոտությունները ցույց տվեցին, որ կարգավորելով անվառարան այլումինաթերմային վերականգնման գործընթացում բովախառնուրդի հալման արագությունը, կարելի է քրոմիտային խտանյութից ստանալ ֆեռոքրոմ բավական մեծ ելքերով: Անհրաժեշտության դեպքում կարելի է ստանալ նաև ֆեխրալ կամ այլ լեգիրող հավելանյութեր:

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. **Боголюбов В.А.** К теории алюминотермического процесса // Сталь, 1958. - 1 1.
2. **Боголюбов В.А.** Зависимость температуры алюминотермического процесса от удельной теплоты // Сталь, 1987. - 1 6.
3. **Добровин А.С.** О температуре металлокерамических процессов // Сб.тр. Челябинского НИИМ. - Вып. 2. - Челябинск: Кн. изд.-во, 1980.

4. Плинер Ю.Л., Сучильников С.И. К вопросу о факторах, определяющих температуру внепечной алюминотермической плавки // Изв. вузов. Черная металлургия. - 1971. - ¹ 11.
5. Мурач Н.Н., Верягин У.Д. Внепечная металлургия // Металургиздат, 1986.
6. Процессы горения в химической технологии и металлургии / Под ред. проф. А.Г. Мержанова. - Черноголовка, 1985. - 288 с.
7. Беляев А.Ф., Комкова Л.Д. Зависимость скорости горения термитов от давления // Журнал физической химии. - 1980. - Т. 24, вып. 2.
8. Плинер Ю.Л., Рубинштейн Е.А., Добровин А.С. Влияние крупности компонентов на протекание внепечного алюминотермического процесса // Тр. Челябинского НИИМ. - Челябинск: Кн. изд-во, 1983.

ՀՊՃՀ. Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 7.03.2005:

**В.А. МАРТИРОСЯН, А.Ю. ШМАВОНЯН, М.Э. САСУНЦЯН, К.Л. ЗАКАРЯН,
А.О. ЧИТАНЯН
ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА СКОРОСТЬ АЛЮМИНОТЕРМИЧЕСКОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ
ХРОМИТОВ**

Изучены кинетические закономерности процесса внепечного алюминотермического восстановления местных хромитовых руд, в частности, факторы, влияющие на скорость восстановления с получением феррохрома (Fe-Cr) или фехрала (Fe-Cr-Al).

Ключевые слова: восстановление, алюминотермия, феррохром, шихта, хромит, концентрат.

**V.H.MARTIROSYAN, A.Yu.SHMAVONYAN, M.E.SASUNTSYAN,
K.L. ZAKARYAN, A. N. CHITANYAN
FACTORS INFLUENCING THE SPEED OF CHROMITE ALUMINIUM-THERMAL RESTORATION
PROCESS**

Kinetic process regularities of non-furnace aluminium-thermal restoration of local chromite ores, in particular, factors influencing restoration speed obtaining ferrochrome (Fe-Cr) or fechrал (Fe-Cr-Al) are studied.

Keywords: restoration, aluminium-thermal, ferrochrome, chromite, concentrate.

Л.А. МКРТЧЯН, М.А. ПОГОСЯН, О.К. ГЕОКЧЯН, Л.М. САВЧЕНКО

РАЗРАБОТКА СОСТАВОВ МЕДИЦИНСКОГО СТЕКЛА НА ОСНОВЕ МЕСТНЫХ СЫРЬЕВЫХ МАТЕРИАЛОВ

В качестве основы для медицинского стекла взят известный состав марки НС-1. Для введения в состав стекла части оксидов кремния и алюминия использован перлит Арагацского месторождения. В результате исследования физико-химических свойств экспериментальных стекол были выявлены два состава, имеющие хорошие перспективы для использования в медицине.

Ключевые слова: медицинское стекло, горные породы, перлит.

В настоящее время в Республике Армения остро встал вопрос организации производства медицинского стекла на основе местных горных пород, т.к. ввозить готовую продукцию или сырьевые материалы экономически невыгодно.

В составе горных пород РА присутствуют практически все основные оксиды, необходимые для получения того или иного состава стекла. Варьируя различными горными породами и добавляя от 10 до 20 масс.% необходимых привозных компонентов, можно получить желаемый состав стекла. Введение в состав медицинских стекол новых оксидов, что не исключается при использовании горных пород, допустимо лишь после фармакологической проверки лечебных препаратов, хранящихся длительное время в сосудах из стекла нового состава.

В табл.1 приведены известные в настоящее время составы медицинских стекол.

Таблица 1

Марка стекол	Компоненты в м а с с. %						
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	B ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O
НС-1	73,00	4,50	4,00	7,00	1,00	8,50	2,00
НС-2	73,00	3,50	2,50	7,00	1,00	11,00	2,00
АВ-1	73,00	3,00	-	7,00	2,50	14,50	-

Исходя из технологичности, в качестве основы был принят состав нейтрального стекла НС-2. Часть оксида кремния в составе стекла ввели с перлитом Арагацского месторождения по следующей схеме: 10; 20; 30; 40; 50; 60 масс.% (табл.2). Химический состав перлита в масс.% следующий: SiO₂-74,00; Al₂O₃-12,60; Fe₂O₃-0,63; CaO-0,88; SO₃-0,15; R₂O-5,54 п.п.п.+вл.-6,20. Полная замена кварцевого песка перлитом нецелесообразна, т.к. возрастает содержание оксида алюминия, что ухудшает технологические свойства стекла – повышается температура варки и выработки.

Таблица 2

К-во вводимого перлита взамен SiO ₂ , в масс. %	Состав стекла в масс. %							
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	B ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	Fe ₂ O ₃
0	73,00	3,50	2,50	7,00	1,00	11,00	2,00	-
10	73,00	3,50	2,50	7,00	1,00	11,00	2,00	0,09
20	73,00	3,50	2,50	7,00	1,00	11,00	2,00	0,17
30	71,30	5,50	2,44	6,84	0,97	10,74	1,95	0,26
40	69,95	7,20	2,40	6,71	0,96	10,54	1,92	0,36
50	68,66	8,81	2,35	6,58	0,94	10,35	1,88	0,42
60	67,34	10,37	2,31	6,46	0,92	10,15	1,84	0,54

Варку стекла проводили в лабораторной печи с карборундовыми нагревателями. Время выдержки при температуре варки $1450 \pm 20^\circ\text{C}$ составляло 40 мин. Расплав стекла отливался в виде пластины и отжигался в муфельной печи. Образцы для исследования химической устойчивости, температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР), вязкости и термостойкости изготавливались механической обработкой полученной пластины.

В связи со специфическими условиями эксплуатации медицинских стекол важно, чтобы они обладали достаточной химической устойчивостью, а именно, кислотостойкостью, водо- и щелочеустойчивостью. Изменение pH среды, находящейся в контакте со стеклом, не должно выходить за пределы физиологического $\text{pH} = 7,4 \pm 0,02$ [1-3].

Для определения водо- и кислотоустойчивости был принят порошковый метод, а для определения щелочеустойчивости – метод штабиков [4,5]. Результаты химической устойчивости исследуемых составов приведены в табл.3.

Таблица 3

Марка стекла	Водоустойчивость к дист. воде (pH 5,8... 6,2) в мл, 0,01N HCl, идущ. на титр-ие	Щелочеустойчивость к 2N NaOH, потери веса – мг на 100 см ² поверхности	Кислотоустойчивость к 2N H ₂ SO ₄ , потери веса в %
1	0,23	11,20	-
2	0,25	13,70	-
3	0,22	13,70	-
4	0,20	-	-
5	0,17	15,15	0,010
6	0,13... 0,15	15,64	0,007
HC-1	0,16	26,29	0,042
HC-2	0,30	24,39	0,044

Введение Al₂O₃ через перлит в состав стекла взамен оксида кремния приводит к сложному изменению химической устойчивости стекла. Замена SiO₂ на Al₂O₃ до 8 масс.% непрерывно и значительно повышает химическую

устойчивость [5,6]. Дальнейшая замена (до 11 масс.%) приводит к более сложному изменению и незначительному повышению устойчивости. Такой ход изменения объясняется происходящими в стекле структурными изменениями, которые зависят от взаимной замены SiO_2 на Al_2O_3 (в стеклах на основе чистых материалов) и одновременной замены SiO_2 на Al_2O_3 и Na_2O на K_2O в стеклах на основе перлита. Учитывая вышеизложенное, можно объяснить достаточно высокую химическую устойчивость исследуемого нами состава №6 по сравнению с исходными стеклами.

Вязкость стекол является важнейшим технологическим свойством, обуславливающим скорость течения реакций стеклообразования, ход осветления расплава, приемы выработки и режимы отжига стеклянных изделий. Обычно вязкость стекол измеряют в области высоких температур, при которых ее значение находится в пределах $10^2 \dots 10^4$ пуаз, и в области температур отжига $10^8 \dots 10^{15}$ пуаз. Значения вязкости в интервале от $10^{4,5}$ до 10^8 пуаз находят экстраполяцией.

Для сравнения вязкостных характеристик исследуемых стекол на основе перлита и стекол, применяемых для выработки дровов медицинского назначения, нами по методу Охотина [7] рассчитаны значения логарифма вязкости – $\lg \eta$ для интервалов температур варки и выработки стеклоизделий. В табл.4 приведены экспериментальные данные для стекол НС-1, НС-2 и исследуемых нами составов стекол 5 и 6.

Как следует из таблицы, в интервале температур варки и выработки наблюдается хорошее совпадение вязкостных характеристик.

Температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР) стекол измеряли на дилатометре ДКВ-4.

Таблица 4

Величина вязкости, $\lg \eta$	НС-1 (расч.) t, °C	НС-2 (расч.) t, °C	5 t, °C	6 t, °C	НС-1 (эксп.) $\lg \eta$	НС-2 (эксп.) $\lg \eta$	Температура, °C
3,0	1342,7	1279,0	1338,1	1342,0	3,05	2,97	1300
4,0	1132,7	1083,1	1132,2	1145,4	4,02	3,90	1050
5,0	995,3	951,0	993,0	1004,0	5,15	5,00	900
9,0	700,6	672,3	707,4	717,0	8,98	8,25	700
10,0	665,7	638,6	672,2	682,0	10,40	9,57	650
11,0	633,8	607,4	641,0	651,0	12,10	11,10	600
12,0	601,0	577,0	611,0	620,5	-	-	-
13,0	573,6	550,0	583,0	592,0	-	-	-
14,0	545,1	524,0	555,0	570,0	-	-	-

Увеличение ТКЛР стекол 5 и 6, по сравнению с общепринятыми составами, связано со значительным увеличением содержания оксида алюминия за счет оксида кремния. В табл.5 приведены данные, полученные на основе кривых термического расширения стекол.

Таблица 5

Марка стекла	ТКЛР, $\alpha_{20-300} \cdot 10^{-7}$ <i>град⁻¹</i>	Температура размягчения, $T_f, ^\circ\text{C}$	Температура начала деформации, $T_{нд}, ^\circ\text{C}$
НС-1	70,7	630	580
НС-2	77,7	610	555
5	80,6	596	547
6	86,9	605	555

Термостойкость выбранных нами составов стекол определялась на цилиндрических стержнях. Образцы испытывались до появления сколов и трещин. Этот показатель для стекол НС-1 и НС-2 составляет 160 и 150 $^\circ\text{C}$ соответственно, для разработанных и выбранных нами составов стекол – 140 и 155 $^\circ\text{C}$.

На основе проведенных испытаний можно сделать вывод о том, что стекла составов 5 и 6 вполне подходят для производства стекла медицинского назначения. Для завершения работы и рекомендации о внедрении в производство разработанных составов необходимо произвести крупнолабораторные исследования стекол и их испытания на медицинских предприятиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Современное состояние работ по синтезу и исследованию составов стекол медицинского назначения / Под ред. **Л.Г. Героименковой**. – М.: Химия, 1974. – 62 с.
2. **Scaglioni O., Vaia A.** Caralterche Chimico - fisiche dei vetri per uso farmaceutico codificnidella US Anei 1,11, 111, IV-Roma, 1969. – 23 p.
3. Стекло медицинское. Технические требования, ГОСТ 19808-74, 1-1-1976, Гос. Комитет стандартов СМ СССР. - М., 1974.
4. Справочник по производству стекла. Том 1 / Под ред. **И.И. Китайгородского, С.И. Сильвестровича**. – М.: Гос. изд-во лит-ры по строит., архит. и стройматериалов, 1963.
5. **Мкртчян Л.А.** Разработка составов и исследование технологических и эксплуатационных свойств тарных полубелых стекол на основе горных пород Армянской ССР: Дис. ... канд. техн. наук.- Л., 1967. - 165 с.
6. **Павлушкин М.М., Сентюрин Г.Г., Ходаковская Р.Я.** Практикум по технологии стекла и ситаллов. – М.: Гос.изд-во лит-ры по строит., архит. и стройматериалов, 1970. – 512 с.
7. **Галахова Г.С., Кутуков А.С., Поволоцкая Т.И.** Технологические свойства стекол медицинского назначения // Стекло и керамика. – 1988. - №1.- С.13-14.

НПП Материаловедения РА . Материал поступил в редакцию 5.10.2003.

Լ.Հ. ՄԿՐՏՉՅԱՆ, Մ.Ա. ՊՈՂՈՍՅԱՆ, Օ.Դ. ԳԵՈՔՉՅԱՆ, Լ.Մ. ՄԱՎՉԵՆԿՈ

ԲԺՇԿԱԿԱՆ ԱՊԱԿԻՆԵՐԻ ԲԱՂԱԴՐՈՒԹՅԱՆ ՄՇԱԿՈՒՄ՝ ՏԵՂԱԿԱՆ ՀՈՒՄՔԻ ՀԻՄԱՆ ՎՐԱ

Բժշկական ապակու համար որպես հիմք ընդունված է հայտնի HC-1 ապակու բաղադրությունը, որի մեջ սիլիկահողի և ալյումինի օքսիդի քանակների մի մասը մտցված է Արագածի պեղիտի միջոցով: Փորձական ապակիների ֆիզիկա-քիմիական հատկությունների ուսումնասիրման արդյունքում ընտրվել են երկու բաղադրություններ, որոնք լավ նախադրյալներ ունեն բժշկության մեջ կիրառվելու համար:

Առանցքային բառեր. բժշկական ապակի, լեռնային ապարներ, պեղիտ:

L.H. MKRTCHYAN, M.A. POGHOSYAN, O.GH. GEOKCHYAN,
L.M. SAVCHENKO

DEVELOPMENT OF MEDICAL GLASS COMPOSITIONS ON THE BASIS OF LOCAL RAW MATERIALS

As a basis for a medical glass the known composition with mark Nanosecond-1 is taken. For introductions in glass composition in the part of silicon and aluminium oxids perlite of the Aragatsian deposit is used. As a result research physical and chemical property studies of experimental glasses two compositions having good prospects are revealed for use in medicine.

Keywords: medical glass, mining rocks, perlite.

З.А. МИНАСЯН, Э.Э. МАИЛЯН

ИССЛЕДОВАНИЕ ОБУВНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА РАСТЯЖЕНИЕ

Исследовано поведение обувных материалов на одноосное растяжение на устройстве ТИРАТЕСТ 2200/2300. Построены диаграммы растяжения обувных материалов в системе координат “относительное удлинение – растягивающее усилие”. Данные по деформациям растяжения обувных материалов являются одними из главных показателей их применимости для изготовления обуви.

Ключевые слова: материал, растяжение, разрыв, рабочая длина, разрывная нагрузка, относительное удлинение.

Повышение требований к качеству и ассортименту обуви и внедрение системы управления ее качеством предопределяют необходимость не только постоянного совершенствования процессов изготовления обуви и обувных материалов, но и повышения уровня контроля качества в производстве.

Качество обуви в основном определяется стабильностью свойств материалов ее составляющих в процессе эксплуатации. В существующих стандартах и технических условиях устанавливаются лишь минимально допустимые нормы на свойства конкретных обувных материалов, хотя совершенно очевидно, что они должны иметь показатели лучше минимально допустимых норм.

Поэтому разработка методов комплексной оценки свойств используемых материалов, однозначно оценивающих их качество и качество готовой продукции, является весьма актуальной задачей.

В данной работе исследуется поведение обувных материалов при растяжении, что является одним из основных критериев их применимости для изготовления обуви. Это объясняется следующими факторами [1,2]:

- обувные материалы формируются в процессе производства обуви растяжением, и поэтому их способность к такой деформации в значительной степени определяет их технологические свойства;
- при носке обуви ее материалы подвергаются повторным растяжениям и в зависимости от того, как они реагируют на повторные растяжения, в значительной степени зависит их качество;
- качество многих листовых материалов оценивается показателями, полученными при испытании их на растяжение до разрыва.

На деформацию растяжения были испытаны следующие образцы обувных материалов:

- а) яловка, лицевая, хромового метода дубления;
- б) бычок хромового метода дубления;
- в) бычина хромового метода дубления;
- г) выросток с лицевым покрытием под змеиную кожу, хромового метода дубления;

д) нитроискожа – Т.

Испытания обувных материалов на одноосное растяжение проводили при их постепенных нагружениях до разрыва на устройстве ТИРАТЕСТ 2200/2300, которое состоит из устройства нагрузки, пульта измерения и управления и периферийных приборов для нагрузки и вывода данных.

Простой ввод данных, удобный зажим испытуемого образца и полностью автоматизированные процессы регистрации, обработки и вывода данных обеспечивают высокую эффективность испытаний.

Образцы обувных материалов для испытаний на растяжение вырубаются в виде двусторонней лопатки согласно стандарту (рис. 1).

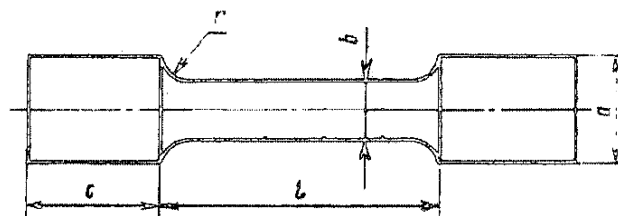


Рис. 1. Форма образца обувного материала

В таблице приведены размеры образцов обувных материалов.

Таблица

Размеры образцов обувных материалов

Размеры, мм				
Рабочая часть образца		Головка образца		Радиус дуги перехода от головки к рабочей части r
Длина l	Ширина b	Ширина a	Длина c	
50	10	20	25	5

Испытание образцов обувных материалов на растяжение проводится в следующей последовательности:

1. Образцы обувных материалов приводятся к воздушно-сухому состоянию.
2. Испытуемые образцы закрепляются в зажимах разрывного устройства ТИРАТЕСТ 2200/2300 и растягиваются постепенно возрастающими усилиями Q до разрыва.
3. Устройство регистрирует растягивающие усилия Q и соответствующие им абсолютные удлинения Δl образцов обувных материалов.
4. Фиксируется разрывное усилие Q и соответствующее ему абсолютное удлинение Δl .

5. Определяются текущие и разрывные относительные удлинения образцов обувных материалов по формуле

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} 100.$$

На рис.2 показаны результаты испытаний указанных выше образцов обувных материалов на растяжение.

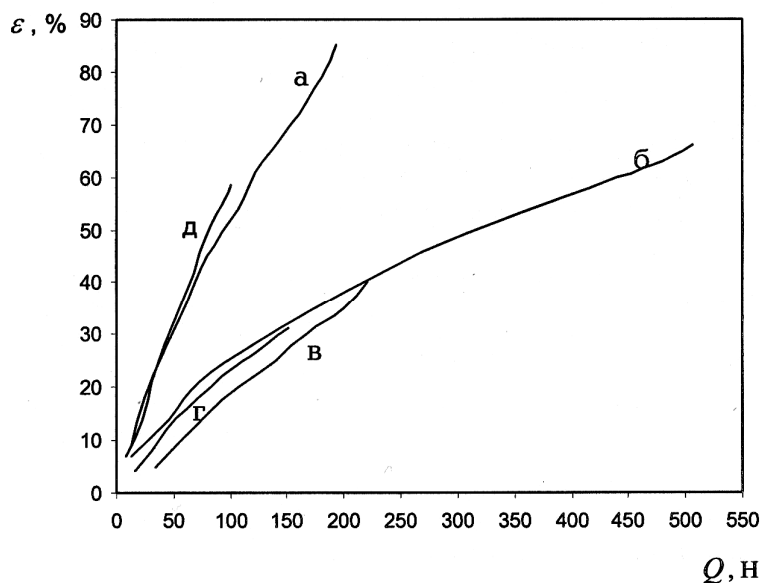


Рис. 2. Диаграммы растяжения обувных материалов

Как видно из рис.2, для всех обувных материалов кривые имеют выпуклость в сторону оси абсцисс, т. е. с увеличением растягивающего усилия Q их относительное удлинение возрастает вплоть до точки разрыва.

Увеличение длины обувных материалов при их одноосном растяжении связано с выпрямлением и ориентацией волокон. При снятии нагрузки длина обувных образцов мгновенно уменьшается на величину упругого удлинения, затем продолжает уменьшаться с замедленной скоростью. Обувной материал никогда не достигает первоначальной длины даже после истечения большого промежутка времени.

Из диаграмм растяжения также видно, что зависимость между относительным удлинением обувного материала и вызывающей его силой можно аппроксимировать степенной зависимостью вида

$$\varepsilon = A Q^n,$$

где коэффициент A зависит от структуры обувного материала, а показатель степени n меньше единицы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Зурабян К.М., Краснов Б.Я., Бернштейн М.М.** Материаловедение изделий из кожи.- М. : Легпромбытиздат, 1988. – 416 с.
2. **Зыбин Ю.П., Авилов А. А., Гвоздев Ю. М., Чернов Н.В.** Материаловедение изделий из кожи.- М. : Легкая индустрия, 1990. – 385 с.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 03.03.2005.

Զ.Ա. ՄԻՆԱՍՅԱՆ , Է.Է. ՄԱՅԻԼՅԱՆ

ԿՈՇԻԿԻ ՆՅՈՒԹԵՐԻ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԸ ԶԳՄԱՆ ԴԵՊԹՈՒՄ

Հետազոտված է կոշիկի նյութերի վարքը միառանցք ձգման դեպքում «Տիրատեստ» 2200/2300 սարքի վրա: Կառուցված են կոշիկի նյութերի ձգման դիագրամները «հարաբերական երկարացում - ձգող ճիգ» կոորդինատական համակարգում: Կոշիկի նյութերի ձգման դեֆորմացիայի տվյալները կոշիկի արտադրությունում դրանց կիրառելիության գլխավոր ցուցանիշներից են:

Առանցքային բառեր. նյութ, ձգում, պատռում, աշխատանքային երկարություն, պատռման բեռնվածք, համեմատական երկարացում:

Z.A. MINASYAN, E.E. MAYILYAN

SHOE MATERIAL STUDY FOR STRETCHING

The behaviour of the shoe material for one-axis stretching is studied on the apparatus TIRATEST 2200/2300. The diagrams of the shoe material stretching are built in the system of coordinates "relative lengthening-stretching power". The data for the deformation of the shoe material strengthening are the main indices of their employment for shoe-making.

Keywords: material, stretching, distortion operating length, distortion load, relative lengthening.

Ա.Հ. ՀՈՎՀԱՆՆԻՍՅԱՆ

ՎԱՐՐՆԹԱՅ ՇԵՐՏԵՐԻ ՀԱՆՈՒՅԹՈՎ ԵՎ ՊԵՐԱՅՈՂ ԼՑԱՆՑՈՒԹՈՎ ՄՇԱԿՄԱՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳԻ ՕՊՏԻՄԱԼԱՑՈՒՄ

Դիտարկվում է չափազանց հզոր հանքամարմնի մշակման վարընթաց շերտերի հանույթով և լցումով համակարգի օպտիմալացման խնդիրը: Շահագործական շերտի մշակման փուլերի թվից կախված հանքաքարի միաժամանակյա հանույթ իրականացնող մուտքափորվածքների քանակի կրճատումը մի կողմից հանգեցնում է լցվածքային զանգվածի պահանջվող ամրությամբ թելադրված լցանյութի արժեքի նվազմանը, մյուս կողմից, հանքի տարեկան արտադրողականությամբ պայմանավորված հանքաքարի արդյունահանման ինքնարժեքի մեծացմանը: Նշված օրինաչափությունների հաշվառմամբ տրվել է շահագործական շերտի մշակման փուլերի օպտիմալ թիվը:

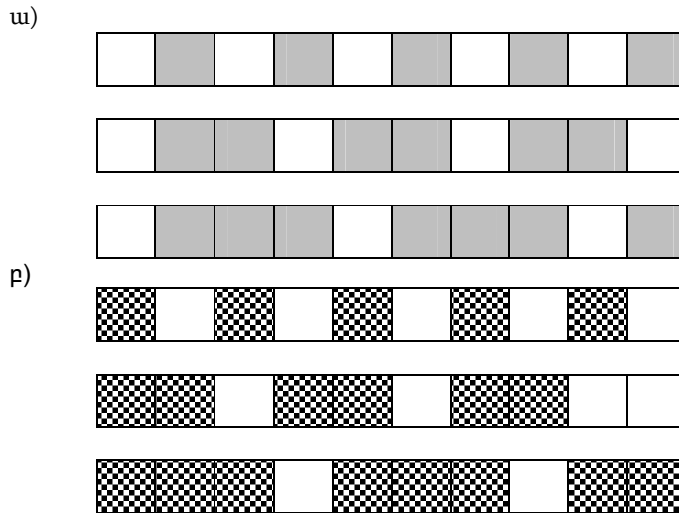
Առանցքային բառեր. հանքաքար, մշակման համակարգ, լցանյութ, փուլ, հանք, արտադրողականություն, մուտքափորվածք:

Վարընթաց շերտերի հանույթով և լցումով մշակման համակարգերը կիրառվում են բարձրարժեք հանքաքարի արդյունահանման դեպքում, քանի որ դրանք բարձր ծախսերին զուգնեցնող ապահովում են ընդերքից օգտակար հանածոյի կորզման որակաքանակական բարձր ցուցանիշներ:

Վարընթաց շերտերի հանույթով և լցումով մշակման համակարգերի առանձնահատկությունն այն է, որ հանքամարմնի մշակումը իրականացվում է սակավաթեք շերտերով արհեստական առաստաղի պաշտպանության տակ: Այն ստեղծվում է վերտեղադրված շերտում հանքաքարի հանույթից հետո մշակված տարածությունը ամբողջովին պնդացող լցանյութով լցնելու արդյունքում: Հանույթային տարածությունում ստեղծված լցվածքային զանգվածը ծածկող և կողային ապարների պահպանման միջոց է ու հուսալի արհեստական առաստաղ՝ յուրաքանչյուր հաջորդական շերտի հանույթի ժամանակ [1]:

Հանքաքարի պաշարների շահագործման տեխնոլոգիան նախատեսում է առաջին հերթին մաքրման մուտքափորվածքների անցկացում, որոնք շերտում տեղադրվում են յուրաքանչյուր մեկ, երկու և ավելի մուտքափորվածքը մեկ, այսինքն՝ շահագործական շերտում մաքրման հանույթի գլխավոր առանձնահատկությունը մշակման փուլայնությունն է, որի էությունը առաջնային մաքրման մուտքափորվածքների և միջմուտքափորվածքային բնամասերի խիստ հաջորդական մշակումն է: Բնամասերը, կախված իրենց լայնությունից, հետագայում հանդես են գալիս որպես երկրորդ, երրորդ և այլ հերթերի մաքրման մուտքափորվածքներ՝ նախորդ մուտքափորվածքները պնդացող խառնուրդներով լցնելուց հետո (նկ. 1):

Այլ հավասար պայմաններում որքան շատ է շահագործական շերտի մշակման փուլերի թիվը, այնքան ցածր է լցվածքային զանգվածի պահանջվող ամրությունը և հետևաբար՝ լցանյութի արժեքը: [2]-ում տեսական երկրամեխանիկական հետազոտություններով հիմնավորվել է շերտի մշակման փուլերի թվից կախված լցանյութի ամրության որոշման բանաձևը՝ առանց ժամանակի գործոնի հաշվառման: Վերջինս ունի հետևյալ տեսքը.



Նկ.1. Վարընթաց շերտերի հանությունը և լցումով մշակման համակարգի դեպքում շահագործական շերտի հանության սկզբում (ա) ու վերջում (բ) մաքրման մուտքափորվածքների մշակման հաջորդականությունը. 1,2,3,4 - մուտքափորվածքների մշակման հերթականությունը

 - հանքաքար  - պնդացող լցանյութ

$$\sigma_u = 0,001 \gamma_w g H K_{\omega} h_2 \frac{n_{\phi}}{l_{\phi} (n_{\phi} - 1)^2}, \quad (1)$$

որտեղ σ_u - ն միջմուտքափորվածքային բնամասի լցանյութային զանգվածի ժամանակավոր դիմադրության սահմանն է ըստ միառանգք սեղմման, $U\eta w$, γ_w - ն՝ վերտեղադրված ապարային հատվածի ծավալային զանգվածը, m/u^3 , g - ն՝ ազատ անկման արագացումը, $g=10 \text{ m/s}^2$, H - ը՝ շահագործական շերտի մշակման խորությունը, u , K_{ω} - ն՝ բնամասի ամրության պաշարի գործակիցը, $K_{\omega} = 2-3$, h_2 - ը շահագործական շերտի բարձրությունն է, u , l_{ϕ} - ը՝ մուտքափորվածքի լայնություն, u , n_{ϕ} - ը՝ շահագործական շերտի մշակման փուլերի թիվը, $h_{\text{ատ}}$:

Մյուս կողմից՝ պնդացող խառնուրդի բաղադրամասերից առավել արժեքավորի՝ ցեմենտային կապակցանյութի բնեղեն տեսակարար ծախսը (P_g) կարելի է որոշել հետևյալ փորձնական արտահայտությամբ [3].

$$P_g = \left[\frac{\sigma_u}{a \sigma_g} \right]^{\frac{1}{b}}, \quad lq/u^3, \quad (2)$$

որտեղ σ_g - ն չափանմուշային (էտալոնային) լցանյութային զանգվածի ժամանակավոր դիմադրության սահմանն է ըստ միառանգք սեղմման, $U\eta w$, a և b - ն էմպիրիկ գործակիցներ են (աղ. 1):

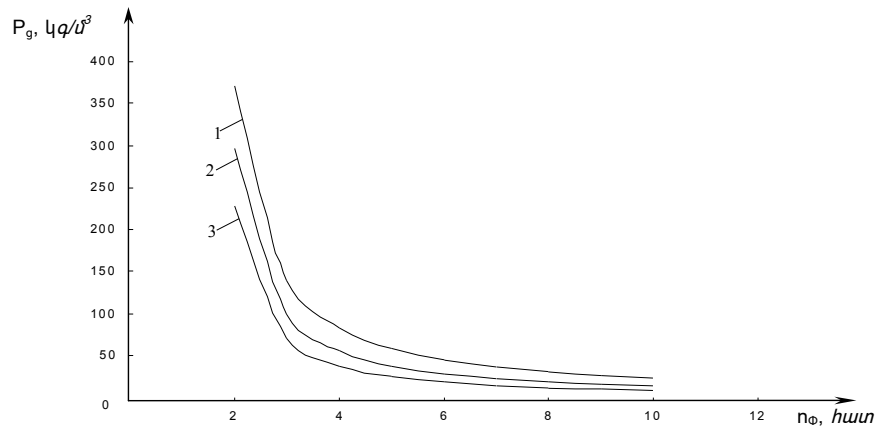
Ցեմենտային կապակցանյութի հաշվարկային պարամետրերը

Ցեմենտի ակտիվությունը, $U\eta_{\text{ա}} (R_g)$	Ցեմենտի մակնիշը	σ_g	a	b
30	300	8,1	0,0025	1,0
40	400	9,7	0,0046	0,9
50	500	11,2	0,0074	0.83

Տեղադրելով (1) բանաձևը (2)-ի մեջ՝ կստանանք շերտի մշակման փուլերի թվից կախված ցեմենտի բնեղեն տեսակարար ծախսի որոշման բանաձևը.

$$P_g = \left[\frac{0,001 \gamma_{\text{ա}} g H K_{\text{ա}} h_z n_{\Phi}}{a \sigma_g l_{\text{ս}} (n_{\Phi} - 1)^2} \right]^{\frac{1}{b}} : \quad (3)$$

Նկար 2-ում բերված է շերտի մշակման փուլերի թվից (n_{Φ}) կախված ցեմենտի բնեղեն տեսակարար ծախսի (P_g) փոփոխման օրինաչափության գծանկարը, երբ $\gamma_{\text{ա}} = 2,5$ տ/մ³, $H = 50$ մ, $K_{\text{ա}} = 3$, $h_z = 3$ մ և $l_{\text{ս}} = 3$ մ:



Նկ. 2. n_{Φ} -ից կախված P_g -ի փոփոխման օրինաչափությունը.

- 1 - ցեմենտի $R_g=30$ $U\eta_{\text{ա}}$ ակտիվության դեպքում
- 2 - ցեմենտի $R_g=40$ $U\eta_{\text{ա}}$ ակտիվության դեպքում
- 3 - ցեմենտի $R_g=50$ $U\eta_{\text{ա}}$ ակտիվության դեպքում

Ըստ ներկայացված տեսական կախումների՝ այլ հավասար պայմաններում շահագործական շերտի մշակման փուլերի թվի մեծացմանը զուգընթաց նվազում է պնդացող լցանյութի արժեքավոր բաղադրամասի՝ ցեմենտի տեսակարար ծախսը: Հետևաբար, մուտքափորվածքի ողջ բարձրությամբ հավասարաչափ ամրությամբ պնդացող լցանյութի լցման դեպքում, ցեմենտի արժեքային տեսակարար ծախսը (3_g) կորոշվի հետևյալ արտահայտությամբ.

$$3_g = \frac{U_g}{\gamma_h} \left[\frac{0,001 \gamma_w g H K_{\omega} h_2 n_{\phi}}{a \sigma_g l_{\phi} (n_{\phi} - 1)^2} \right]^{\frac{1}{b}}, \$/m, \quad (4)$$

որտեղ U_g - ն 1 կգ ցեմենտի շուկայական գինն է, որը կախված է ցեմենտի մակնիշից (300 մակնիշի ցեմենտի դեպքում ընդունվում է $U_g=0,044 \text{ \$/կգ}$, 400 մակնիշի ցեմենտի դեպքում՝ $U_g=0,050 \text{ \$/կգ}$ և 500 մակնիշի ցեմենտի դեպքում՝ $U_g=0,06 \text{ \$/կգ}$), γ_h - ն հանքաքարի ծավալային զանգվածն է, $\gamma_h=2.5 \text{ տ/մ}^3$:

Միևնույն ժամանակ, ինչպես պարզորոշ երևում է նկար 1-ից, որքան փոքր է շահագործական շերտի մշակման փուլերի թիվը, այնքան շատ է միաժամանակյա անցման մեջ գտնվող հանքաքարի հանույթ իրականացնող մուտքափորվածքների թիվը և, հետևաբար, շերտի մշակման ինտենսիվության ավելացման շնորհիվ, մեծ է հանքի արտադրական հզորությունը:

Դիտարկենք ստորգետնյա հանքի տարեկան արտադրողականության (A , տ/տարի) որոշման խնդիրը՝ միաժամանակյա հանույթ իրականացնող մուտքափորվածքների թվից կախված, առանց պահուստային բլոկների և նախապատրաստական ու կտրման աշխատանքների ժամանակ հանքաքարի արդյունահանման ծավալների հաշվառման: Այն կարելի է ներկայացնել հետևյալ արտահայտությամբ.

$$A = N n_h n_p n_{\phi} P_{\phi}, \quad (5)$$

որտեղ N - ը տարեկան աշխատանքային օրերի թիվն է, o_p , n_h - ը՝ օրական աշխատանքային հերթափոխերի թիվը, *հերթափոխ*, n_p - ն՝ հանքում միաժամանակյա մշակման մեջ գտնվող շահագործական բլոկների թիվը, *հատ*, n_{ϕ} - ը՝ 1 շահագործական բլոկի հանությամբ շերտում միաժամանակյա անցման մեջ գտնվող մուտքափորվածքների թիվը, *հատ*, P_{ϕ} - ը 1 մուտքափորվածքի հանքախորշի հերթափոխային արտադրողականությունն է, տ/հերթ :

Ելնելով տեխնոլոգիական նկատառումներից և հաշվի առնելով այն կազմակերպչական հանգամանքը, որ նախքան ստորին շերտի հանքաքարի մաքրահանությի սկսելը, վերին շերտի լցանյութը պետք է լինի պնդացած, ժամանակ շահելու տեսակետից շերտի մշակումը նպատակահարմար է իրականացնել հաջորդաբար՝ այն բաժանելով 2 մասի: Հետևաբար.

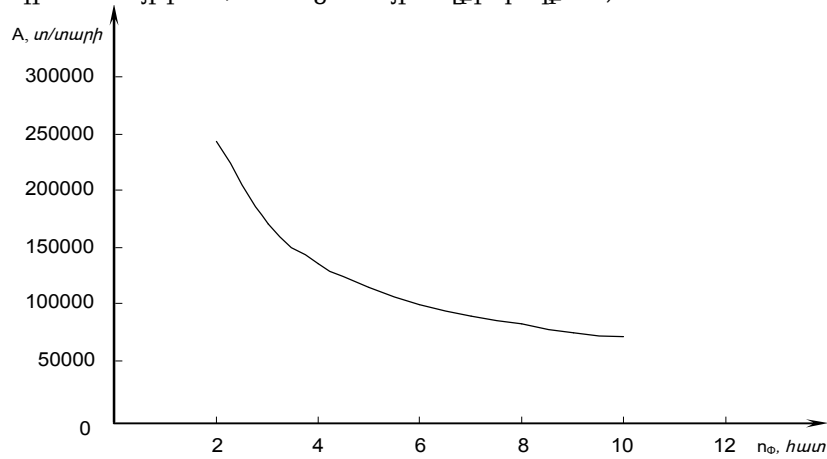
$$\frac{L_p}{2} = l_{\phi} n_{\phi} + b_p (n_{\phi} - 1), \quad (6)$$

որտեղ L_p - ն հզոր հանքամարմնի տարածման ուղղությամբ շահագործական բլոկի երկարությունն է (բարձող-առբերող լեռնային մեքենաների օգտագործման պարագայում բլոկի երկարության ռացիոնալ չափը կազմում է $100 \dots 150 \text{ մ}$), b_p - ն՝ միջմուտքափորվածքային արհեստական բնամասի լայնությունն է, որը ըստ [2] աշխատանքում բերված հիմնավորման $b_p=(n_{\phi}-1)l_{\phi}$:

Տեղադրելով b_p որոշման արտահայտությունը (6) բանաձևի մեջ և կատարելով որոշ ձևափոխություններ՝ կստանանք շահագործական շերտի մշակման փուլերի թվից կախված հանքաքարի միաժամանակյա հանույթ իրականացնող մուտքափորվածքների թվի որոշման արտահայտությունը.

$$n_{\phi} = \frac{L_p}{2n_{\phi}l_{\phi}} - \frac{1}{n_{\phi}} + 1: \quad (7)$$

Նկար 3-ում ներկայացված է շերտի մշակման փուլերի թվի (n_{Φ}) աճից կախված հանքի տարեկան արտադրողականության (A , $տ/տարի$) նվազման գրաֆիկը, երբ $N=305$ $օր$, $n_h=3$ $հերթ$, $n_p=1$ $հատ$, $L_p=100$ $մ$, $l_{\Phi}=3$ $մ$, $P_{\Phi}=30$ $տ/հերթ$. (մուտքավորվածքի 9 $մ^2$ լայնակի հատույթի և 1,3 $մ$ անցումային ելքի դեպքում):



Նկ. 3. n_{Φ} -ից կախված A փոփոխման օրինաչափությունը

Իր հերթին, ակադ. Մ.Բ. Ազոշկովի հիմնարար հետազոտության [4] համաձայն, 1տ հանքաքարի ստորգետնյա արդյունահանման լրիվ ինքնարժեքն (C_l , $\$/տ$) արտահայտվում է հետևյալ հավասարությամբ.

$$C_l = C_1 A + \frac{C_2}{A} + C_3, \quad (8)$$

$$C_1 = \frac{K'_{l2}}{Q_2}, \quad (9)$$

$$C_2 = E_2 + q''_{unh} + \frac{K''_t}{t}, \quad (10)$$

$$C_3 = e_1 + q'_{unh} + a_1 + \frac{K''_{l2}}{Q_2} + \frac{K'_t}{t}, \quad (11)$$

որտեղ K'_{l2} - ը հանքի լեռնակապիտալ փորվածքների և տեխնիկական, տնտեսական ու տրանսպորտային շինությունների կառուցման տեսակարար կապիտալ ներդրումների համամասնական մասն է, $\$/տարի/տ$, K''_{l2} - հանքի լեռնակապիտալ փորվածքների և տեխնիկական, տնտեսական ու տրանսպորտային շինությունների կառուցման կապիտալ ներդրումների հաստատուն մասն է, որը կախված չէ A -ից, $\$$, Q_2 - հանքաքարի շահագործական պաշարներն են, $տ$, E_2 - ջրհեռացման ու հիմնական հորիզոնի փորվածքների պահպանման տարեկան շահագործական ծախսերն են, որոնք կախված չեն A -ից, $\$/տարի$, q'_{unh} - ներհանքային տեղափոխման (բացատարման ու վերելքի) և համահանքային տեսակարար շահագործական ծախսերի համամասնական մասն է, $\$/տ$, q''_{unh} - հանքաքարի ներհանքային տեղափոխման (բացատարման ու վերելքի) և համահանքային տարեկան

շահագործական ծախսերն են, որոնք կախված չեն A -ից, $\$/տարի$, K'_t - բացատարման, վերելքի, հանքի էներգետիկական տնտեսության, օդափոխման և օժանդակ արտադրամասերի էլեկտրամեխանիկական սարքավորումների ձեռքբերման տեսակարար կապիտալ ներդրումների համամասնական մասն է, $\$/տարի/տ$, K''_t - բացատարման, վերելքի, հանքի էներգետիկական տնտեսության, օդափոխման և օժանդակ արտադրամասերի էլեկտրամեխանիկական սարքավորումների ձեռքբերման կապիտալ ներդրումների հաստատուն մասն է, որը կախված չէ A -ից, $\$$, a_1 - ը մաքրման և նախապատրաստական աշխատանքներում անմիջական օգտագործվող սարքավորումների տեսակարար ամորտիզացիոն հատկացումներն են, $\$/տ$, e_1 - ը հանքաքարի մաքրահանույթի և նախապատրաստման, բլոկի նախապատրաստական փորվածքների ու հանքափողի վերանորոգման տեսակարար շահագործական ծախսերն են, $\$/տ$:

Հարկ է նշել այն, որ e_1 մեծությունը կարելի է դիտարկել որպես հաստատուն շահագործական ծախսեր միայն այն դեպքում, երբ մշակման համակարգի տեխնիկատեխնոլոգիական և կազմակերպչական լուծումներն ու կառուցվածքային տարրերի պարամետրերը անփոփոխ են:

Տվյալ պարագայում e_1 մեծությունը հաստատուն չէ, քանի որ, համաձայն վերը նշվածի, փոփոխական է հանքաքարի մաքրահանույթի ինքնարժեքի մաս կազմող պնդացող խառնուրդի ցեմենտի ծախսը:

Հետևաբար՝ կարելի է գրել.

$$e_1 = e'_1 + 3_g, \quad (12)$$

որտեղ e'_1 - ը հանքաքարի մաքրահանույթի և նախապատրաստման (մշակման համակարգի), բլոկի նախապատրաստական փորվածքների ու հանքափողի վերանորոգման տեսակարար շահագործական ծախսերն են, առանց պնդացող խառնուրդի ցեմենտի ծախսի հաշվառման, $\$/տ$:

Վերջինս, վարընթաց շերտերի հանույթով ու լցումով մշակման համակարգի կիրառման դեպքում կազմում է՝ $e'_1 = 5.6 \$/տ$: Հետևաբար՝

$$C_h = 5,6 + \frac{I_g}{\gamma_h} \left[\frac{0,001 \gamma_w g H K_w h_2 n_\phi}{a \sigma_g l_d (n_\phi - 1)^2} \right]^{\frac{1}{b}}, \quad \$/տ: \quad (13)$$

Ստորգետնյա հանքի շահագործման տեխնիկատնտեսական հաշվարկների արդյունքները թույլ են տալիս սահմանել հետևյալ կախվածությունները.

$$K_{12} = 8A + 1800000, \quad \$, \quad (14)$$

$$3_{\text{այլ}} = 3,6 + \frac{206000}{A}, \quad \$/տ, \quad (15)$$

որտեղ K_{12} - ը հանքի լեռնակապիտալ փորվածքների և տեխնիկական, տնտեսական ու տրանսպորտային շինությունների կառուցման կապիտալ ներդրումների ընդհանուր գումարն է, $\$$, $3_{\text{այլ}}$ - ը հանքի այլ տեսակարար շահագործական ծախսերն են՝ առանց մշակման համակարգի ինքնարժեքի հաշվառման, $\$/տ$:

Եթե ընդունենք, որ հանքամարմնում հանքաքարի շահագործական պաշարները կազմում են $Q_2 = 1300 \text{ հազ. տ}$, ապա կարող ենք որոշել C_1 , C_2 և C_3 թվային մեծությունները.

$$C_1 = \frac{8}{1300000} = 0,000006, \quad C_2 = 206000, \quad C_3 = \frac{1800000}{1300000} + 3,6 + 5,6 = 10,6:$$

Բոլոր անհրաժեշտ մեծությունների որոշման բանաձևերը տեղադրելով (8) արտահայտության մեջ կստանանք.

$$C_l = 0,000006 N n_h n_p P_d \left(\frac{L_p}{2 n_\phi l_d} - \frac{1}{n_\phi} + 1 \right) + \frac{206000}{N n_h n_p P_d \left(\frac{L_p}{2 n_\phi l_d} - \frac{1}{n_\phi} + 1 \right)} + \frac{P_g}{\gamma_h} \left[\frac{0,001 \gamma_w g H K_w h_z n_\phi}{a \sigma_g l_d (n_\phi - 1)^2} \right]^{\frac{1}{b}} + 10,6: \quad (16)$$

Աղյուսակ 2-ում բերված են վերն ընդունված որոշակի տեխնիկատեխնոլոգիական հավասար պարամետրերի դեպքում (3) և (16) բանաձևերի հաշվարկման արդյունքները, իսկ նկար 4-ում՝ շահագործական շերտի մշակման փուլերի թվից (n_ϕ) կախված՝ հանքաքարի արդյունահանման ինքնարժեքի (C_l) փոփոխման օրինաչափության գծանկարը:

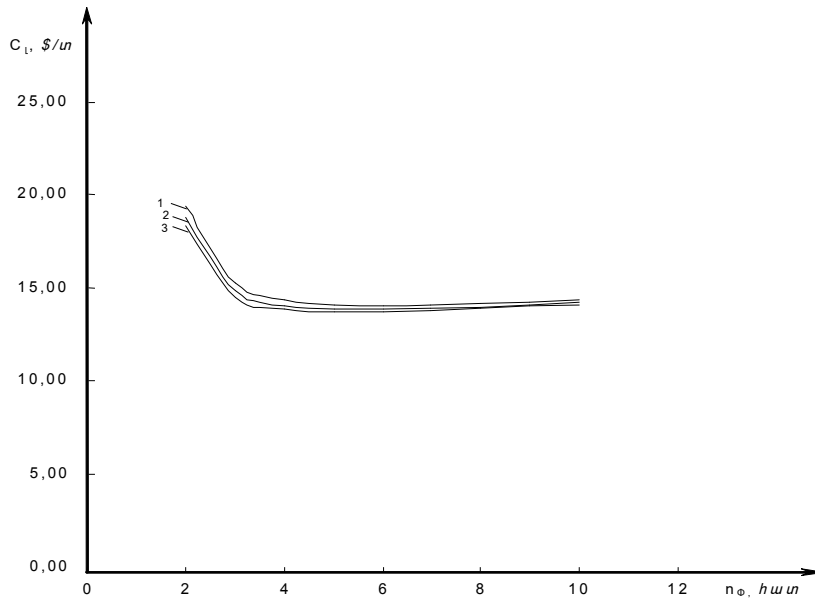
Աղյուսակ 2

Հաշվարկման արդյունքների ամփոփ տվյալները		
$n_\phi, \text{ հատ}$	$C_l, \$/\text{տ}$	$P_g, \text{ կգ/մ}^3$
1	2	3
300 մակնիշի ցեմենտ		
2	19,42	370
3	15,28	139
4	14,38	82
5	14,11	58
6	14,06	44
7	14,08	36
8	14,16	30
9	14,25	26
10	14,35	23
400 մակնիշի ցեմենտ		
2	18,85	297
3	14,83	100
4	14,05	56
5	13,85	38
6	13,84	28
7	13,90	22
8	13,99	18
9	14,10	16
10	14,22	13

Աղյուսակ 2-ի շարունակությունը

500 մակնիշի ցեմենտ		
2	18,37	228
3	14,51	70
4	13,83	37
5	13,68	24
6	13,70	18
7	13,78	14
8	13,89	11
9	14,01	9
10	14,14	8

Աղյուսակ 2-ի տվյալների վերլուծությունը ցույց է տալիս, որ 300 և 400 մակնիշի ցեմենտի օգտագործման դեպքում, օպտիմալ է շերտի մշակման 6- փուլանի ենթատարբերակը, իսկ 500 մակնիշի ցեմենտի օգտագործման դեպքում՝ 5- փուլանի ենթատարբերակը, քանի որ դրանք ապահովում են հանքաքարի արդյունահանման նվազագույն ծախսեր:



Նկ. 4. ոֆ-ից կախված C_u -ի փոփոխման օրինաչափությունները.

- 1 - ցեմենտի $R_g=30$ ՄՊՊ ալտիվության դեպքում
- 2 - ցեմենտի $R_g=40$ ՄՊՊ ալտիվության դեպքում
- 3 - ցեմենտի $R_g=50$ ՄՊՊ ալտիվության դեպքում

Միևնույն ժամանակ, ինչպես նշված է վերը, շերտում հանքաքարի հանույթը իրականացվում է պնդացող լցանյութից ստեղծված արհեստական առաստաղի պաշտպանության տակ: Հետևաբար՝ առաստաղի ամրության ու կայունության

ապահովման համար անհրաժեշտ է ունենալ օգտագործվող ցեմենտի նվազագույն տեսակարար ծախսը, ինչը ելնելով համակարգի կիրառման փորձից, կազմում է մոտ 100 կգ/մ³:

Ըստ կատարված տեսական հետազոտության եկել ենք այն եզրահանգմանը, որ դիտարկվող համակարգի կիրառման դեպքում շերտի մշակման փուլերի օպտիմալ թվի որոշումը միայն ծածկող ապարների պահպանման խնդրի լուծման արդյունքներով ծախսերի նվազարկմամբ, անբավարար է: Անհրաժեշտ է լցանյութի մերկացման մակերևույթի կայունության ապահովման համար, որպես տեխնիկական սահմանափակում, հաշվի առնել նաև լցանյութում ցեմենտի բնեղեն տեսակարար ծախսի սահմանաքանակը:

Ամփոփելով վերը շարադրվածը՝ կարելի է կատարել հետևյալ առաջարկությունները.

1. Վարընթաց շերտերի հանույթով և պնդացող լցանյութով մշակման համակարգի կիրառման դեպքում, երբ որպես կապակցանյութ օգտագործվում է 300 և 400 մակնիշի ցեմենտ, ապա տնտեսապես առավել նպատակահարմար է շերտի մշակումն իրականացնել 6 փուլերով, իսկ 500 մակնիշի ցեմենտի օգտագործման դեպքում՝ 5 փուլերով, քանի որ դրանք ապահովում են հանքաքարի արդյունահանման նվազագույն ինքնարժեքներ (համապատասխանաբար 14,06, 13,84, 13,68 \$/տ): Սակայն, քանի որ այդ ենթատարբերակները բնութագրվում են կապակցանյութի այնպիսի ծախսերով (համապատասխանաբար՝ 44, 28, 24 կգ/մ³), որոնք չեն կարող ապահովել արհեստական առաստաղի կայունությունը, ապա նախքան մուտքափորվածքների լցնելը ցեմենտի նշված ծախսերով բնութագրվող լցանյութերով, անհրաժեշտ է դրանց բարձրության որոշակի մասը լցնել 100 կգ/մ³-ից ոչ պակաս ցեմենտի ծախսով լցանյութ, կամ էլ դրանց հատակին կառուցել երկաթբետոնե սալ: Այդ տարբերակները կոչվում են վարընթաց շերտերի հանույթով և մաքրման մուտքափորվածքի բարձրությամբ տարբեր ամրությամբ պնդացող լցանյութի լցմամբ մշակման համակարգեր:

2. Վարընթաց շերտերի հանույթով և մաքրման մուտքափորվածքի ողջ բարձրությամբ հավասարաչափ ամրությամբ պնդացող լցանյութի լցմամբ մշակման համակարգի տարբերակի կիրառման դեպքում, երբ օգտագործվում է 300 և 400 մակնիշի ցեմենտ, օպտիմալ է երեք փուլերով շերտի մշակումը, քանի որ դա, համապատասխանաբար 139 ու 100 կգ/մ³ ցեմենտի ծախսով պայմանավորված, արհեստական առաստաղի կայունության ապահովման հետ մեկտեղ, բնութագրվում է հանքաքարի արդյունահանման համեմատաբար նվազագույն ծախսերով (15,28 և 14,83 \$/տ):

Ինչ վերաբերում է 500 մակնիշի ցեմենտի օգտագործմանը, ապա ակնհայտ է շերտի մշակման երկփուլ ենթատարբերակի կիրառման նպատակահարմարությունը, որի դեպքում ցեմենտի ծախսը կազմում է 228 կգ/մ³, իսկ հանքաքարի արդյունահանման ինքնարժեքը՝ 17,46 \$/տ:

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. **Агошков М.И., Борисов С.С., Боярский В.А.** Разработка рудных и нерудных месторождений. -М.: Недра, 1983. – 424 с.
2. **Оганесян А.Г.** Геомеханическое обоснование порядка очистной выемки при нисходящей системе разработки с послыйной выемкой руды с твердеющей закладкой// Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. -2004.- Т. 57, N2.- С. 260-265.
3. **Баранов А.О.** Проектирование технологических схем и процессов подземной добычи руд: Справочное пособие. -М.: Недра, 1993. – 283 с.
4. **Агошков М.И.** Определение производительности рудника. -М.: Metallurgizdat, 1948. – 271 с.

ՀՊՃՀ: Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 30.05.2005:

А.Г. ОГАНЕСЯН

ОПТИМИЗАЦИЯ НИСХОДЯЩЕЙ СИСТЕМЫ РАЗРАБОТКИ С ПОСЛОЙНОЙ ВЫЕМКОЙ РУДЫ С ТВЕРДЕЮЩЕЙ ЗАКЛАДКОЙ

Рассматривается задача оптимизации нисходящей системы разработки с послыйной выемкой руды с твердеющей закладкой. В зависимости от числа стадий отработки эксплуатационного слоя сокращение количества заходов, осуществляющих одновременную выемку руды, приводит, с одной стороны, к снижению стоимости закладки требуемой прочности закладочного массива, с другой стороны – к увеличению себестоимости добычи руды, обусловленной годовой производительностью рудника. С учетом отмеченных закономерностей дано оптимальное число стадий отработки эксплуатационного слоя.

Ключевые слова: руда, система разработки, закладка, стадия, рудник, производительность, заходка.

A.H. HOVHANNESYAN

OPTIMIZATION OF THE FALLING DEVELOPMENT SYSTEM WITH LAYER ORE EXTRACTION AND HARDENING FILLING

An optimization problem of the falling development system with layer ore extraction and hardening filling is considered. Depending on optimization stage number of the operating layer the filling quantity reduction realizing at the same time ore extraction, results, on the one hand, in decreasing filling cost of the required strength for filling mass, and, on the other hand, increasing ore mining cost due to annual mine productivity. Taking into account the mentioned regularities the optimum step number of operating layer is given.

Keywords: extraction, ore, operating layer, mass, falling, cost, filling.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ АНИЗОТРОПИИ ГОРНЫХ ПОРОД ПОД ВЫСОКИМ ДАВЛЕНИЕМ

Методом прохождения ультразвуковых волн определены и исследованы анизотропные свойства амфиболитов под высоким давлением. Показано, что показатель анизотропии модуля упругости в зависимости от текстуры, плоскости слоистости и сланцеватости пород имеет две оси симметрии: параллельную и перпендикулярную к плоскости напластования. Показатель анизотропии в зависимости от величины всестороннего высокого давления и угла плоскости напластования может резко измениться.

Ключевые слова: анизотропия, скалывание, слоистость, сланцеватость, трахиоидность, деформация, колебание, ультразвук, керн, радиальный, тангенциальный, сжатие, акустика.

Анизотропия является следствием упорядоченности в расположении структурных элементов и их ориентации. Анизотропными могут быть любые породы, а именно, магматические, осадочные и метаморфические. Важнейшей характеристикой анизотропии горных пород считается степень неодинаковости проявления некоторых свойств в разных направлениях. Обычно эти направления рассматриваются и оцениваются через угол встречи оси скважины с какой-то плоскостью, а именно, скалывания, слоистости, сланцеватости, трахиоидности и т.д. [1,2].

Существует большое разнообразие способов оценки степени анизотропии горных пород:

- по изменению механической скорости бурения в разных направлениях;
- по значению упругой деформации или разрушающего напряжения (твердости) породы при вдавливании штампа;
- по изменению некоторых свойств при воздействии на породу определенных физических полей – теплового, высокочастотного, силового в разных направлениях и др.;
- по скорости прохождения ультразвука и т.д.

В Государственном инженерном университете Армении разработаны методика и средства определения степени анизотропии горных пород под высоким давлением (до 100 МПа) по скорости прохождения ультразвука.

Данный метод позволяет определить параметры анизотропии у пород со скрытой, визуально невидимой внутренней слоистостью, а также у магматических пород, где индикатором анизотропии выступает направление кристаллизации, невидимое на поверхности образца (керн). Ультразвуковой прибор «Искра-226», ДВК-3 позволяет генерировать ультразвуковые колебания в диапазоне 100...2000 кГц.

Для получения достоверных результатов по измерению скоростей ультразвука необходимо соблюдать определенное соотношение между размерами образцов керна, частотой колебаний f , длиной волны λ и скоростью v . В камере высокого давления испытывались кубики амфиболитов и диабазов под разными углами к линиям текстуры, размеры которых изменяются в пределах от 18 до 21 мм. Если учесть, что скорость продольных ультразвуковых волн в зависимости от плотности пород меняется в диапазоне 2500...8500 м/с, то, исходя из соотношения $v = \lambda f$ для существующих диаметров керна, частота колебаний в пределах 100...1000 кГц вполне удовлетворяет.

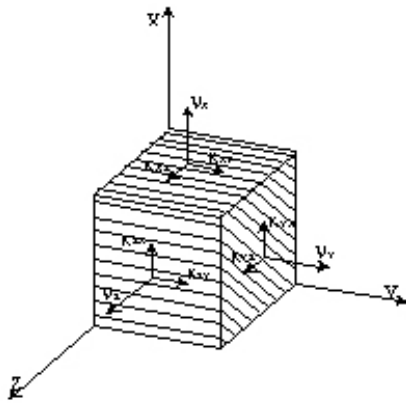


Рис.1. Схематическое обозначение направления ультразвуковых волн (V_x , V_y , V_z) и показателей анизотропии (K_{xy} , K_{xz} , K_{yz} , K_{yx} , K_{zx} , K_{zy})

Измерение проводилось в трехосных взаимно перпендикулярных направлениях образцов, которые находились в сжатом состоянии со всех сторон (рис.1). Давление в камере можно регулировать в пределах от 0 до 10 килобар. Датчики излучателя и приемника ультразвуковой установки закрепляются на образцах соосно на параллельных зашлифованных поверхностях, а выходы выносятся наружу и присоединяются к осциллографу.

Для достоверности данных с каждой породы подготавливаются по шесть и более образцов с разными углами слоистости.

На основании полученных значений скоростей количественно оценена степень анизотропии слоистых (сланцеватых) и

кристаллических текстур:

$$k_{xy} = \frac{V_x}{V_y}, k_{xz} = \frac{V_x}{V_z}, k_{yz} = \frac{V_y}{V_z}, \quad (1)$$

где k_{xy} , k_{xz} , k_{yz} – показатели анизотропии по разным плоскостям; V_x , V_y , V_z – скорости распространения ультразвуковых волн.

Если показатель анизотропии отличается от единицы, то порода анизотропна.

По данным [3], существует функциональная связь между углами падения, слоистости φ и скоростями v прохождения ультразвука во взаимно перпендикулярных плоскостях:

$$\varphi = \frac{90^\circ}{1 + \frac{V_x - V_z}{V_x - V_y}}. \quad (2)$$

Известно, что модуль упругости E среды связывается со скоростью v распространения звука следующей зависимостью:

$$E = v^2 \rho, \quad (3)$$

где ρ - плотность среды.

На основании (3) запишем выражение для расчета показателя анизотропии по модулю упругости по двум взаимно перпендикулярным направлениям – параллельному $V_{\parallel}$ и перпендикулярному $V_{\perp}$ к плоскостям сланцеватости, принимая длину волны одинаковой в обоих направлениях:

$$\frac{E_{\parallel}}{E_{\perp}} = \frac{v_{\parallel}^2 P_{\parallel}}{v_{\perp}^2 P_{\perp}}. \quad (4)$$

В таблице приведены результаты экспериментального определения показателей анизотропии амфиболитов по акустическим свойствам (K_{xy} , K_{xz} , K_{yz}) и расчетного показателя анизотропии по упругости (E_{xy} , E_{xz} , E_{yz}) под разными углами сланцеватости и давления.

Измерения скорости ультразвука производились с помощью датчиков (тензорезисторов), наклеенных в двух взаимно перпендикулярных направлениях на боковые поверхности образцов с шестью ориентациями. По полученным данным скорость распространения ультразвуковых волн в направлении вдоль слоистости ($\varphi=0^\circ$) имеет наибольшее значение ($V=6090 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$), соответственно величина модуля упругости имеет наибольшее значение ($E = 3,24$). С увеличением угла наклона оси сравнения по отношению к радиальному и тангенциальному направлениям величина модуля упругости резко уменьшается. Это объясняется тем, что деформативность в диагональном направлении, перпендикулярном слоистости, выше, чем в радиальном и тангенциальном. Второе обстоятельство, которое представляет интерес в этих опытах, свидетельствует о том, что при сжатии под углом 45° в направлении к ориентированным структурным элементам в тангенциальной плоскости уменьшается не только продольный, но и поперечный размеры образца.

На рис. 2а представлена в полярных координатах кривая изменения показателя анизотропии амфиболита по модулю упругости (E_{yz}) при нулевом давлении, а на рис. 2б – при давлении 40 МПа. На рисунках ясно видно, что для этого образца породы характерны две оси симметрии кривой, отражающей изменение показателя анизотропии по модулю упругости. Аналогичную, но несколько видоизмененную форму имеют кривые показателя анизотропии по радиальным (E_{xy}) и тангенциальным (E_{xz}) направлениям.

На рис. 3 и 4 изображены зависимости показателя анизотропии (E_{yz} и E_{xy}) от давления (P) и угла плоскости напластования. Анализ этих зависимостей показывает, что под всесторонним давлением до 40 МПа резко уменьшаются величины модуля упругости и, соответственно, показатели анизотропии в зависимости от направления напластования в 1,5...2 раза, а под давлением от 40 до 100 МПа существенного изменения не происходит.

Таблица

Результаты экспериментального определения показателей анизотропии амфиболитов по акустическим свойствам (K_{xy} , K_{xz} , K_{yz}) и расчетного показателя анизотропии по упругости (E_{xy} , E_{xz} , E_{yz}) под разными углами сланцеватости и давления

P, МПа	0	20	40	60	80	100
φ , град	0					
K_{xy}	1,37	1,23	1,16	1,13	1,12	1,09
K_{xz}	1,80	1,40	1,29	1,24	1,21	1,19
K_{yz}	1,32	1,13	1,11	1,09	1,08	1,08
E_{xy}	1,88	1,52	1,35	1,29	1,25	1,19
E_{xz}	3,24	1,96	1,66	1,54	1,46	1,41
E_{yz}	1,74	1,29	1,23	1,19	1,16	1,16
φ , град	30					
K_{xy}	1,20	1,13	1,10	1,06	1,05	1,05
K_{xz}	1,43	1,27	1,20	1,17	1,14	1,15
K_{yz}	1,19	1,13	1,11	1,11	1,08	1,10
E_{xy}	1,45	1,28	1,16	1,12	1,10	1,10
E_{xz}	2,04	1,61	1,44	1,37	1,30	1,33
E_{yz}	1,41	1,27	1,24	1,22	1,18	1,21
φ , град	60					
K_{xy}	0,91	1,02	1,04	1,03	1,00	0,99
K_{xz}	0,69	0,86	0,91	0,85	0,88	0,88
K_{yz}	0,75	0,84	0,87	0,82	0,88	0,88
E_{xy}	0,83	1,04	1,08	1,06	1,00	0,98
E_{xz}	0,48	0,74	0,83	0,80	0,77	0,77
E_{yz}	0,57	0,71	0,76	0,76	0,77	0,77
φ , град	90					
K_{xy}	0,58	0,69	0,81	0,83	0,82	0,81
K_{xz}	0,86	0,84	0,92	0,94	0,94	0,93
K_{yz}	1,50	1,20	1,14	1,13	1,14	1,14
E_{xy}	0,33	0,48	0,66	0,69	0,67	0,66
E_{xz}	0,74	0,70	0,85	0,88	0,87	0,87
E_{yz}	2,23	1,44	1,29	1,28	1,30	1,30

Известно, что в условиях равномерного всестороннего сжатия, в зависимости от текстуры пород, происходит либо упругая, либо остаточная деформация. Обычно в породах с явно выраженной слоистостью или сланцеватостью модуль упругости в направлении слоистости больше, чем в направлении, перпендикулярном слоистости, иногда наблюдается и обратное явление. Как видно из табл., обратное явление происходит и для амфиболитов при углах больше 45° .

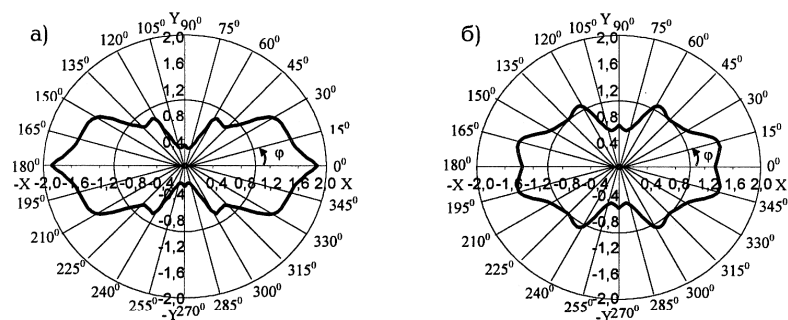


Рис.2. Полярные диаграммы показателя анизотропии амфиболитов по модулю упругости E под высоким давлением P при: а - $P=0$ МПа; б - $P=40$ МПа

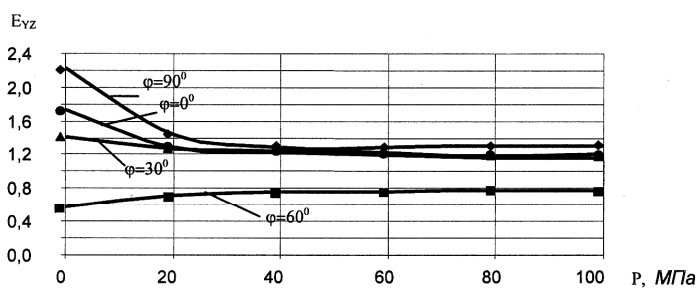


Рис.3. Зависимости показателя анизотропии (E_{yz}) от давления (P) и угла плоскости напластования (φ)

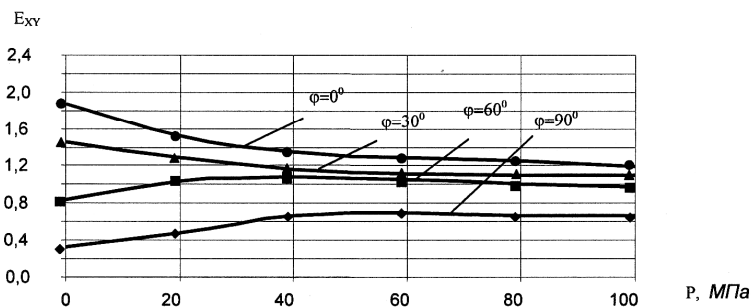


Рис.4. Зависимости показателя анизотропии (E_{xy}) от давления (P) и угла плоскости напластования (φ)

Так как процесс искривления скважин формируется на забое скважины при сильном взаимодействии породоразрушающего инструмента и горной породы при условии, если она анизотропна, то интенсивность искривления может возрастать многократно, т.е. диктует свои условия. В связи с этим представляется более продуктивным изучение процессов, происходящих при искривлении скважин в анизотропных породах, с целью использования этих

значений при проектировании траекторий скважин и создании технологий управления искривлениями.

Обработка и анализ экспериментальных данных приводят к следующим выводам:

1. Показатель анизотропии по модулю упругости имеет две оси симметрии – параллельную и перпендикулярную к плоскостям напластования.
2. В зависимости от величины всестороннего равномерного сжатия и текстуры пород резко изменяются модуль упругости, коэффициент Пуассона, прочность на сжатие и другие свойства, что приводит к увеличению или уменьшению показателя анизотропии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сулакшин С.С. Направленное бурение. – М.: Недра, 1987. – 272 с.
2. Калинин А.Г., Левицкий А.З. Технология бурения разведочных скважин на жидкие и газообразные полезные ископаемые. – М.: Недра, 1988. – 370 с.
3. Кривошеев В.В. Искривление скважин в анизотропных породах. – Томск: НТЛ, 1999. – 240 с.

ГИУА . Материал поступил в редакцию 15.06.2004.

Ռ.Զ.ՀԱԿՈԲՅԱՆ ԱՊԱՐԱՆԵՐԻ ԱՆԻՑՈՏՐՈՊՈՒԹՅԱՆ ՑՈՒՑԱՆԻՇԻ ՈՐՈՇՈՒՄԸ ԲԱՐՁՐ ՃՆՇՄԱՆ ՏԱՎ

Բարձր ճնշման տակ հետազոտման են ենթարկվել անիզոտրոպ հատկություններով օժտված թերթային կառուցվածք ունեցող ամֆիբոլիտային ապարների նմուշներ՝ դրանց միջով տարբեր անկյունների տակ անցկացնելով ուլտրաձայնային ալիքներ: Արդյունքները ցույց են տվել, որ առաձգականության մոդուլի անիզոտրոպության ցուցանիշն ունի սիմետրիայի երկու առանցքներ՝ ա) թերթայնության հարթությանը զուգահեռ և բ) ուղղահայաց ուղղություններով և, կախված ապարների կառուցվածքից և համակոորդատների հավասարաչափ ճնշման մեծությունից, կարող է կտրուկ փոփոխվել:

Առանցքային բառեր. անիզոտրոպություն, սահքապոկում, թերթայնություն, շերտայնություն, տրախիտիդայնություն, դեֆորմացիա, տատանում, ուլտրաձայն, հորատահանում, շառավղային, տանգենցիալ, սեղմում, ակուստիկա:

R.Z. HAKOBYAN DETERMINATION OF ROCK ANISOTROPY UNDER HIGH PRESSURE

Anisotropy properties of amphibolites under high pressure are determined and investigated by the ultrasound method. It is known that elasticity module anisotropy index depends on texture; lamination plane shaling of rocks has two symmetry axes – parallel with and perpendicular to the lamination plane. Depending on the value of high pressure and lamination plane angle, the anisotropy index may change according to the rock texture and high pressure value.

Keywords: anisotropy, spalling, stratification, shaling, strain, oscillation, ultrasound, sample, radial, tangent, compression, acoustics.

Ա.Ա. ԱՂԱՅԱՆ

ԿԱՊԱՐԻ ՍՈՒԼՖԻԴԱՅԻՆ ԽՏԱՆՑՈՒԹԻ ՕՔՍԻԴԱՐԱՐ ԲՈՎՄԱՆ ԳՈՐԾԸՆԹԱՑԻ ՈՒՍՈՒՄՆԱՍԻՐՈՒՄԸ

Ուսումնասիրվել է կապար պարունակող սուլֆիդային խտանյութի օքսիդարար բովման գործընթացը՝ սուլֆատացման ջերմաստիճանային տիրույթում: Ցույց է տրված, որ բովման գործընթացի իրականացումը 565...575 °C ջերմաստիճաններում ապահովում է կապարի սուլֆիդի փոխակերպումը սուլֆատի, ինչը լավագույն նախադրյալ է հետագա տարրալուծման և մետաղական կապարի նստեցման պրոցեսները նատրիումի քլորիդի ջրային լուծույթում կատարելու համար:

Առանցքային բառեր. կապար, սուլֆիդ, սուլֆատ, բովում, օքսիդացում, սուլֆատացում:

Կապարի խտանյութի (հիմնական սուլֆիդային բաղադրիչը՝ PbS, աղյուսակ) օքսիդարար բովումը կատարվել է՝ այն հիդրոմետալուրգիական վերամշակման նախապատրաստելու համար: Սուլֆիդային ֆազերի փոխակերպման ջերմաստիճանային կապն ուսումնասիրվել է 500...700 °C տիրույթում (նկ.1): Ամեն մի ջերմաստիճանում պահման տևողությունը կազմել է համապատասխանաբար 4, 6 և 8 ժամ:

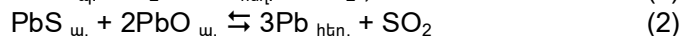
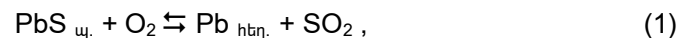
Աղյուսակ

Կապարատար խտանյութի քիմիական և միներալոգիական կազմը

Տարրերը	Pb	Cu	Zn	Fe	S	Այլ տարրեր
Պարունակումը, %	11,20	16,50	9,02	25,17	35,10	մնացածը
Միներալը	PbS	CuFeS ₂	ZnS	CuFeS ₂	սուլֆիդներ	SiO ₂ , CaO, MgO, Au, Ag, Se, Te

Պրոցեսի ընթացքում $PbS \rightarrow PbSO_4$ փոխակերպման հավանականությունը գնահատվել է կշռազանգվածի փոփոխության՝ ելքային սվյալների հետ համեմատությամբ և արգասիքների ($ZnSO_4$, $CuSO_4$)՝ ծծմբական թթվի թույլ ջրային լուծույթներում լուծելիությամբ:

Նշված տիրույթից ավելի բարձր ջերմաստիճաններում բացառվել է խտանյութի բովումը, որպեսզի կանխվի հեղուկ ֆազի գոյացումն ըստ հետևյալ ռեակցիաների [1].



և բովվածքի ազդեցությունը:

Փորձնական տվյալներով կառուցված գրաֆիկներից (նկ. 1) երևում է, որ 500 °C – ից ցածր ջերմաստիճաններում խտանյութի բովման դեպքում կապարի սուլֆիդը, հավանաբար, օքսիդանում է $PbS \rightarrow PbSO_4 \cdot PbO$ սխեմայով, ինչը պայմանավորում է նմուշի զանգվածի նվազագույն փոփոխությունը: 500...575 °C ջերմաստիճաններում նմուշի զանգվածի փոփոխությունը համեմատական է բովման տևողությանը ու համարյա մնում է անփոփոխ՝ ջերմաստիճանի բարձրացմանը զուգընթաց:

Դա բացատրվում է նրանով, որ այդ ջերմաստիճաններում բովման դեպքում տեղի է ունենում կապարի սուլֆիդի օքսիդացում առավելապես սուլֆատագոյացման մեխանիզմով՝ ըստ հետևյալ ռեակցիայի՝



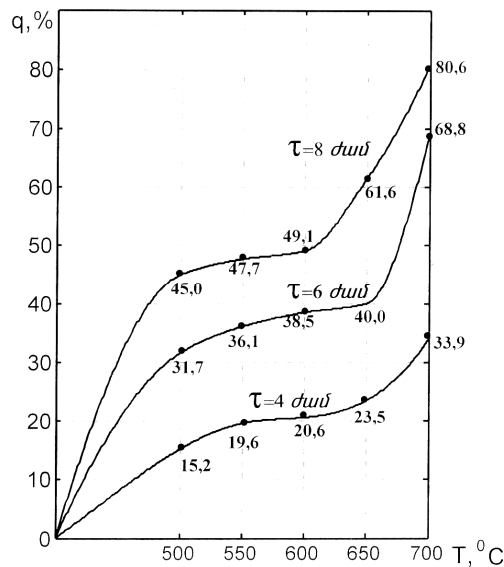
որի համար ազատ էներգիայի փոփոխության ջերմաստիճանային ֆունկցիայի հավասարումը հետևյալ տեսքն ունի (ջերմադինամիկական տվյալներն ըստ [2,3] -ի)՝

$$\Delta G^0_T = -822,29 + 0,353 T \text{ ԿՋ/մոլ},$$

իսկ ռեակցիայի հավասարակշռության հաստատունը՝

$$\ln K_p = -\frac{\Delta G^0_T}{RT} = \frac{98899}{T} - 42,46:$$

Հետագոտվող ջերմաստիճանային տիրույթում (3) ռեակցիայի ազատ էներգիայի փոփոխության բավականին մեծ բացասական արժեքները խոսում են դրա ընթանալու մեծ հավանականության մասին (նկ. 2):



Նկ. 1. Խտանյութի նմուշի զանգվածի հարաբերական փոփոխության կախվածությունը բովման ջերմաստիճանից և տևողությունից

Որքան ցածր է ջերմաստիճանը, այնքան մեծ է (3) ռեակցիայի ընթանալու հավանականությունը, ինչը պայմանավորված է նրա էնթալպիայի մեծ բացասական արժեքով:

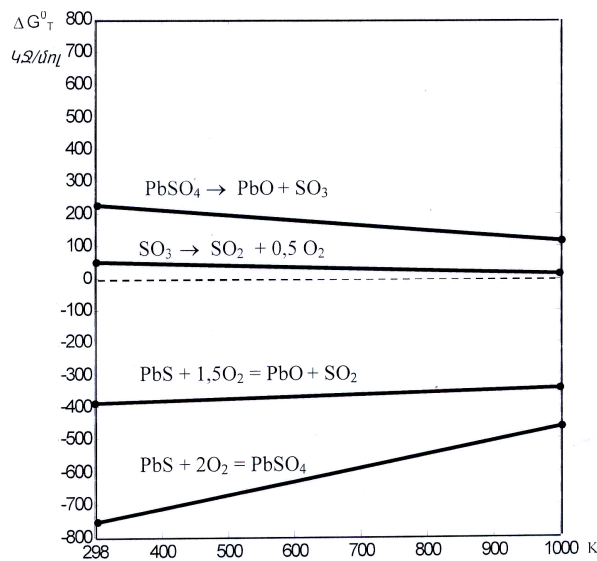
Պարզ է նաև (նկ. 1), որ 565 ... 575 °C –ից ավելի բարձր ջերմաստիճաններում կտրուկ նվազում է նմուշների քաշը, որը նշանակալի է երկարատև բովման դեպքերում:

Դա նշանակում է, որ բարձր ջերմաստիճաններում սուլֆատային ֆազի անկայունության պատճառով առավել հավանականորեն ընթանում է սուլֆիդի լրիվ օքսիդացման ռեակցիան՝



որի համար

$$\Delta G^0_T = -400,73 + 0,0776 T \text{ ԿՋ/մոլ}, \ln K_P = -\frac{\Delta G^0_T}{RT} = \frac{48197}{T} - 9,33:$$



Նկ. 2. Բովման ռեակցիաների ազատ էներգիաների փոփոխության կախվածությունը ջերմաստիճանից

Հավանաբար, գործընթացի սկզբնական տաքացման փուլում (3) ռեակցիայի հետևանքով գոյացած սուլֆատը բարձր ջերմաստիճաններում քայքայվում է՝ փոխակերպվելով օքսիդի.



(5) և (6) ռեակցիաների համար ազատ էներգիայի փոփոխության հավասարումներն են՝

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. Шиврин Г. Н. Металлургия свинца и цинка.- М.: Металлургия, 1982.-352 с.
2. Рябин В. А., Остроумов М. А., Свит Т. Ф. Термодинамические свойства веществ: Справочник.-Л.: Химия, 1977.- 392 с.
3. Кубашевский О., Олкок К.Б. Металлургическая термехимия.-М.: Металлургия, 1982.- 392 с.
4. Американская рентгенографическая картотека ASTM.

ՀՊՃՀ: Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 25. 12. 2004:

Ա.Ա. АГАЯН

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОКИСЛИТЕЛЬНОГО ОБЖИГА СУЛЬФИДНОГО КОНЦЕНТРАТА СВИНЦА

Проведено исследование процесса окислительного обжига сульфидного концентрата свинца в сульфатизирующем температурном интервале. Показано, что проведение обжига при 565...575 °С обеспечивает превращение сульфида свинца в сульфат, что является лучшей предпосылкой для последующего выщелачивания и осаждения металлического свинца в водном растворе хлористого натрия.

Ключевые слова: свинец, сульфид, сульфат, обжиг, окисление, сульфатизация.

A. A. AGHAYAN

INVESTIGATION OF THE OXIDATIVE ROASTING PROCESS FOR THE SULPHIDE LEAD CONCENTRATE

The oxidative roasting process for sulphatization of sulphide lead concentrate is investigated. It have been showed that the roasting at 565...575 °C can completely convert the lead sulphide into sulphate which is a good condition for leaching and precipitation of metallic lead in sodium chloride solution.

Keywords: lead, sulphide, sulphate, roasting, oxidation, sulphatization.

С.С. ДАРБИНЯН

ОБ ОДНОЙ РЕОЛОГИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ТЕОРИИ КОЛЕБАНИЙ

Рассматриваются колебания упругой системы с одной степенью свободы при наличии нелинейного сопротивления. Получены законы изменения внешних и внутренних сил. Приведены формулы для вычисления максимальных напряжений с использованием предлагаемой реологической модели.

Ключевые слова: модель, реология, напряжение, сопротивление, колебание.

Рассмотрим колебания линейно-упругой системы, снабженной дополнительно неупругим сопротивлением, вызывающим затухание колебаний. Примем реологическую модель, предложенную в [1]

$$\sigma^* = E^* \varepsilon^* + \eta^* \frac{d\varepsilon^*}{dt}, \quad (1)$$

где величины со звездочкой являются комплексными числами:

$$E^* = E_0 e^{i\alpha}, \quad \eta^* = \eta_0 e^{i\beta}.$$

Предположим, имеем невесомый брус длиной ℓ с площадью поперечного сечения F . По торцам бруса приложена продольная сила P^* . Тогда

$$\sigma^* = \frac{P^*}{F}, \quad \varepsilon^* = \frac{y^*}{\ell},$$

где y^* - удлинение бруса.

На основании (1) получим

$$P^* = \frac{E^* F}{\ell} y^* + \frac{\eta^* F}{\ell} \frac{dy^*}{dt}. \quad (2)$$

Положим, что рассматриваемый брус заделан в грунт, совершающий вертикальные колебания с амплитудой $y_0^*(t)$. Пусть на конце бруса приложен груз массой m . Тогда внешняя сила P^* заменится силой инерции:

$$-m \left(\frac{d^2 y^*}{dt^2} + \frac{d^2 y_0^*}{dt^2} \right).$$

Выражение (2) запишется следующим образом:

$$-m \left(\frac{d^2 y^*}{dt^2} + \frac{d^2 y_0^*}{dt^2} \right) = \frac{E^* F}{\ell} y^* + \frac{\eta^* F}{\ell} \frac{dy^*}{dt}$$

или окончательно:

$$\frac{d^2 y^*}{dt^2} + 2n_0 e^{i\beta} \frac{dy^*}{dt} + \omega^2 e^{i\alpha} y^* = -\frac{d^2 y_0^*}{dt^2}, \quad (3)$$

$$\text{где } 2n_0 = \frac{\eta_0 F}{m \ell}, \quad \omega^2 = \frac{E_0 F}{m \ell}.$$

Полученный результат легко обобщить на любые линейные дифференциальные уравнения колебаний, снабженные диссипативными членами по гипотезе Фойхта. Для этого нужно смещение y записать в комплексной форме y^* , в диссипативные члены ввести вместо множителя $2\eta_0$ множитель $2n_0 e^{i\beta}$ и вместо круговых частот ω^2 ввести $\omega^2 e^{i\alpha}$. В зависимости от вида деформации Π_0 и ω запишутся соответствующим образом.

Здесь мы ограничимся рассмотрением случая, когда колебание совершается по гармоническому закону, причем свободными колебаниями пренебрегаем, то есть рассматриваем установившиеся вынужденные колебания.

Допустим, что

$$\begin{aligned} y_0^* &= A^* e^{ipt} = (A_1 + iA_2) e^{ipt} = A_1 e^{ipt}, \\ y^* &= B^* e^{ipt} = (B_1 + iB_2) e^{ipt}. \end{aligned} \quad (4)$$

Подставляя эти значения в (3) и сокращая на e^{ipt} , получим

$$-B^* p^2 + 2in_0 p B^* e^{i\beta} + \omega^2 B^* e^{i\alpha} = A_1 p^2,$$

$$B^* = \frac{p^2 A_1}{\omega^2 e^{i\alpha} + 2in_0 p e^{i\beta} - p^2}$$

или

$$B^* = \frac{A_1}{\frac{\omega^2}{p^2} e^{i\alpha} + 2i \frac{n_0}{p} e^{i\beta} - 1}. \quad (5)$$

Знаменатель выражения (5) можно преобразовать следующим образом:

$$\begin{aligned}
\frac{\omega^2}{p^2} e^{i\alpha} + 2i \frac{n_0}{p} e^{i\beta} - 1 &= \frac{\omega^2}{p^2} (\cos \alpha + i \sin \alpha) + 2i \frac{n_0}{p} (\cos \beta + i \sin \beta) - 1 = \\
&= \frac{\omega^2}{p^2} \cos \alpha + i \frac{\omega^2}{p^2} \sin \alpha + i \frac{2n_0}{p} \cos \beta - \frac{2n_0}{p} \sin \beta - 1 = \\
&= \frac{\omega^2}{p^2} \cos \alpha - \frac{2n_0}{p} \sin \beta - 1 + i \left(\frac{\omega^2}{p^2} \sin \alpha + \frac{2n_0}{p} \cos \beta \right).
\end{aligned}$$

Обозначим

$$\begin{aligned}
C_1 &= \frac{\omega^2}{p^2} \cos \alpha - \frac{2n_0}{p} \sin \beta - 1, \\
C_2 &= \frac{\omega^2}{p^2} \sin \alpha + \frac{2n_0}{p} \cos \beta.
\end{aligned} \tag{6}$$

Тогда
$$\frac{\omega^2}{p^2} e^{i\alpha} + 2i \frac{n_0}{p} e^{i\beta} - 1 = C_1 + iC_2.$$

На основании (5) получим

$$B^* = \frac{A_1}{C_1 + iC_2}, \quad B^* = \frac{A_1(C_1 - iC_2)}{C_1^2 + C_2^2}.$$

Имея в виду, что $B^* = B_1 + iB_2$, получим

$$B^* = B_1 + iB_2 = \frac{A_1 C_1}{C_1^2 + C_2^2} - i \frac{A_1 C_2}{C_1^2 + C_2^2},$$

откуда

$$B_1 = \frac{A_1 C_1}{C_1^2 + C_2^2}, \quad B_2 = - \frac{A_1 C_2}{C_1^2 + C_2^2}.$$

Подставляя сюда значения C_1 и C_2 из (6), получим

$$\begin{aligned}
B_1 &= \frac{\frac{\omega^2}{p^2} \cos \alpha - \frac{2n_0}{p} \sin \beta - 1}{\left(\frac{\omega^2}{p^2} \cos \alpha - \frac{2n_0}{p} \sin \beta - 1 \right)^2 + \left(\frac{\omega^2}{p^2} \sin \alpha + \frac{2n_0}{p} \cos \beta \right)^2} A_1, \\
B_2 &= - \frac{\frac{\omega^2}{p^2} \sin \alpha + \frac{2n_0}{p} \cos \beta}{\left(\frac{\omega^2}{p^2} \cos \alpha - \frac{2n_0}{p} \sin \beta - 1 \right)^2 + \left(\frac{\omega^2}{p^2} \sin \alpha + \frac{2n_0}{p} \cos \beta \right)^2} A_1.
\end{aligned}$$

Обозначив $\frac{\omega}{p} = \gamma$, $\frac{2n_0}{p} = \mu$, получим

$$\begin{aligned} B_1 &= \frac{\gamma^2 \cos \alpha - \mu \sin \beta - 1}{(\gamma^2 \cos \alpha - \mu \sin \beta - 1)^2 + (\gamma^2 \sin \alpha + \mu \cos \beta)^2} A_1, \\ B_2 &= -\frac{\gamma^2 \sin \alpha + \mu \cos \beta}{(\gamma^2 \cos \alpha - \mu \sin \beta - 1)^2 + (\gamma^2 \sin \alpha + \mu \cos \beta)^2} A_1. \end{aligned} \quad (7)$$

На основании (3) и (4) определим вещественные части внешней силы P , силы сопротивления Q и реакции R :

$$\begin{aligned} P &= \operatorname{Re}\left(-\frac{d^2 y^*}{dt^2} - \frac{d^2 y_0^*}{dt^2}\right) = p^2[(A_1 + B_1)\cos pt - B_2 \sin pt], \\ Q &= \operatorname{Re}(2n_0 e^{i\beta} \frac{dy^*}{dt}) = -2n_0 p[B_1 \sin(pt - \beta) + B_2 \cos(pt - \beta)], \end{aligned} \quad (8)$$

$$R = \operatorname{Re}(\omega^2 e^{i\alpha} y^*) = \omega^2[B_1 \cos(pt + \alpha) - B_2 \sin(pt + \alpha)].$$

Из (8) найдем величину R , когда затухание отсутствует ($\alpha=0$), то есть найдем $\operatorname{Re}(\omega^2 y^*) = R_{\text{упр.}}$:

$$R_{\text{упр.}} = \omega^2(B_1 \cos pt - B_2 \sin pt). \quad (9)$$

Тогда отношение внешней силы к упругой будет равно

$$\begin{aligned} K &= \frac{P}{R_{\text{упр.}}} = \frac{p^2[(A_1 + B_1)\cos pt - B_2 \sin pt]}{\omega^2(B_1 \cos pt - B_2 \sin pt)}, \\ K &= \frac{p^2}{\omega^2} \left[1 + \frac{A_1 \cos pt}{B_1 \cos pt - B_2 \sin pt} \right] \end{aligned}$$

или

$$K = \frac{1}{\gamma^2} \left(1 + \frac{A_1 \cos pt}{B_1 \cos pt - B_2 \sin pt} \right), \quad (10)$$

где B_1 и B_2 определяются по формулам (7).

Таким образом, при известных значениях параметров γ , μ , α , β с помощью (10) оценим степень изменения внешних и внутренних сил по предложенной модели.

Рассмотрим частный случай, когда $t=0$. Тогда из (10) получим

$$K = K_0 = \frac{1}{\gamma^2} \left(1 + \frac{A_1}{B_1} \right).$$

Подставляя значения B_1 из (7), после некоторых преобразований получим

$$K_0 = \frac{\gamma^2 + 4 \frac{n_0^2}{\omega^2} + \frac{2n_0}{\omega\gamma} \sin\beta - \cos\alpha + \frac{4n_0}{p} \sin(\alpha - \beta)}{\gamma^2 \cos\alpha - 1 - 2 \frac{n_0}{p} \sin\beta}$$

или

$$K_0 = \frac{\gamma^4 + \mu^2 + \mu \sin\beta - \gamma^2 \cos\alpha + 2\gamma^2 \mu \sin(\alpha - \beta)}{\gamma^2 (\gamma^2 \cos\alpha - 1 - \mu \sin\beta)}. \quad (11)$$

При $\gamma=1$ из (11) получим

$$K_0|_{\gamma=1} = -1 + \frac{\mu [\mu + 2 \sin(\alpha - \beta)]}{\cos\alpha - 1 - \mu \sin\beta}.$$

В частном случае, когда $p_0=0$ ($\mu=0$), получим

$$K_0 = \frac{\gamma^2 - \cos\alpha}{\gamma^2 \cos\alpha - 1}.$$

Полученное выражение совпадает с результатом по гипотезе Сорокина [2].

Если принять $\alpha=0$, то из (11) получим случай гипотезы Фойхта [3]:

$$K_0|_{\alpha=0} = \frac{\gamma^4 + \mu^2 + \mu \sin\beta - \gamma^2 - 2\gamma^2 \mu \sin\beta}{\gamma^2 (\gamma^2 - 1 - \mu \sin\beta)}$$

или

$$K_0|_{\alpha=0} = 1 + \frac{\mu [\mu + (1 - \gamma^2) \sin\beta]}{\gamma^2 (\gamma^2 - 1 - \mu \sin\beta)}.$$

Перейдем к определению напряжений при принятой реологической модели.

Принимая $\varepsilon^* = \varepsilon_0 e^{i\omega t}$, на основании (1) получим

$$\sigma^* = \varepsilon_0 e^{i\omega t} (\Xi_0 e^{i\alpha} + i\omega\eta_0 e^{i\beta}). \quad (12)$$

Действительная часть выражения (12) представляет собой величину истинного напряжения. Подставляя значения $e^{i\omega t}$, $e^{i\alpha}$ и $e^{i\beta}$, выраженные через тригонометрические функции, после некоторых преобразований получим

$$\sigma = \sigma_0 [\cos(\omega t + \alpha) - \lambda \omega \sin(\omega t + \beta)], \quad (13)$$

где $\lambda = \frac{\eta_0}{E_0}$, $\sigma_0 = E_0 \varepsilon_0$.

Нетрудно убедиться, что (13) можно записать следующим образом:

$$\sigma = \sigma_0 [(\cos \alpha - \lambda \omega \sin \beta) \cos \omega t - (\sin \alpha + \lambda \omega \cos \beta) \sin \omega t]$$

Умножим и разделим правую часть этого равенства на

$$\sqrt{(\cos \alpha - \lambda \omega \sin \beta)^2 + (\sin \alpha + \lambda \omega \cos \beta)^2}.$$

Тогда получим следующее значение напряжения:

$$\sigma = \sigma_0 \sqrt{(\cos \alpha - \lambda \omega \sin \beta)^2 + (\sin \alpha + \lambda \omega \cos \beta)^2} \cdot \cos(\omega t + \gamma), \quad (14)$$

где

$$\begin{aligned} \cos \gamma &= \frac{\cos \alpha - \lambda \omega \sin \beta}{\sqrt{(\cos \alpha - \lambda \omega \sin \beta)^2 + (\sin \alpha + \lambda \omega \cos \beta)^2}}, \\ \sin \gamma &= \frac{\sin \alpha + \lambda \omega \cos \beta}{\sqrt{(\cos \alpha - \lambda \omega \sin \beta)^2 + (\sin \alpha + \lambda \omega \cos \beta)^2}}. \end{aligned}$$

Из (14) определим отношение максимального напряжения к σ_0 :

$$\theta = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_0} = \sqrt{(\cos \alpha - \lambda \omega \sin \beta)^2 + (\sin \alpha + \lambda \omega \cos \beta)^2}$$

или

$$\theta = \sqrt{1 + 2\lambda \omega \sin(\alpha - \beta) + \lambda^2 \omega^2}. \quad (15)$$

Рассмотрим случай малых α и β . Примем, что

$$E^* = E_0(1 + i\alpha), \quad \eta^* = \eta_0(1 + i\beta), \quad \varepsilon^* = \varepsilon_0 e^{i\omega t}.$$

Следовательно, (*) запишется следующим образом:

$$\sigma^* = E^* \varepsilon^* + \eta^* \dot{\varepsilon}^* = \sigma_0 e^{i\omega t} [(1 - \beta \lambda \omega) + i(\alpha + \lambda \omega)].$$

Действительную часть этого выражения обозначим через σ_M , которая представляет собой величину напряжений при малых α и β :

$$\sigma_M = \sigma_0 [(1 - \beta \lambda \omega) \cos \omega t - (\alpha + \lambda \omega) \sin \omega t]. \quad (16)$$

После некоторых преобразований получим

$$\sigma_M = \sigma_0 \sqrt{(1 - \beta \lambda \omega)^2 + (\alpha + \lambda \omega)^2} \cdot \cos(\omega t + \gamma_M), \quad (17)$$

где $\cos \gamma_M = \frac{1 - \beta \lambda \omega}{\sqrt{(1 - \beta \lambda \omega)^2 + (\alpha + \lambda \omega)^2}}, \quad \sin \gamma_M = \frac{\alpha + \lambda \omega}{\sqrt{(1 - \beta \lambda \omega)^2 + (\alpha + \lambda \omega)^2}}.$

Из (17) определим величину $\sigma_M^{\max}$:

$$\sigma_M^{\max} = \sigma_0 \sqrt{(1 - \beta \lambda \omega)^2 + (\alpha + \lambda \omega)^2}.$$

Значит, $\theta_M = \frac{\sigma_M^{\max}}{\sigma_0} = \sqrt{(1 - \beta \lambda \omega)^2 + (\alpha + \lambda \omega)^2}.$

Пренебрегая α^2 и β^2 по отношению к единице, получим

$$\theta_M = \sqrt{1 + 2\lambda\omega(\alpha - \beta) + \lambda^2\omega^2}. \quad (18)$$

Нетрудно видеть, что формулы (17) и (18) (случай малых α и β) можно получить из общего случая, то есть из (14) и (15), принимая в них $\sin \alpha = \alpha$, $\sin \beta = \beta$, $\cos \alpha = 1$, $\cos \beta = 1$, $\sin(\alpha - \beta) = \alpha - \beta$.

Таким образом, изменение напряжений по принятой реологической модели определится по формуле (15), а при малых α и β - по формуле (18).

Отметим, что для количественной оценки влияния затухания на величину напряжений по принятой модели необходимо установить значения параметров μ , λ , α , β и т.д., входящих в полученные формулы.

Не останавливаясь на подробностях выбора этих параметров, приведем результаты некоторых вычислений по формуле (15), которые сведены в таблицу.

Таблица

Значения (по формуле (15)

$\alpha - \beta$ $\lambda \omega$	30; 150	60; 120	90	180	210; 330	240; 300	270
0	1	1	1	1	1	1	1
0,1	1,053	1,088	1,100	1,005	0,954	0,915	0,900
0,2	1,114	1,185	1,200	1,020	0,917	0,883	0,800
0,3	1,179	1,236	1,300	1,044	0,889	0,755	0,700
0,4	1,249	1,361	1,400	1,077	0,872	0,684	0,600
0,5	1,323	1,455	1,500	1,118	0,866	0,620	0,500
0,6	1,400	1,549	1,600	1,166	0,872	0,506	0,400
0,7	1,480	1,644	1,700	1,221	0,889	0,527	0,300
0,8	1,562	1,604	1,800	1,281	0,917	0,504	0,200
0,9	1,646	1,835	1,900	1,345	0,594	0,501	0,100
1,0	1,732	1,932	2,000	1,414	1,000	0,518	0,090

Как видно из таблицы, не всегда принятая реологическая модель приводит к уменьшению максимальных напряжений. Это в основном зависит от величин исходных параметров. Однако при их правильном выборе имеет место заметное уменьшение напряжений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Назаров А.Г.** Метод инженерного анализа сейсмических сил. - Ереван: Изд. АН АрмССР, 1959.-315 с.
2. **Дарбинян С.С.** Оценка неупругого сопротивления при сейсмических колебаниях // Сейсмостойкое строительство.- М., 2004.- С. 34 - 36.
3. **Дарбинян С.С.** Об учете сил сопротивления при сейсмических колебаниях // Известия строителей Армении.- Ереван, 2004.- N2.- С. 29 - 31.

ЕрГУАС. Материал поступил в редакцию 22.06.2004.

Ս.Ս. ԴԱՐԲԻՆՅԱՆ

ՏԱՏԱՆՈՒՄՆԵՐԻ ՏԵՍՈՒԹՅԱՆ ՄԵԿ ՌԵՈԼՈԳԻԱԿԱՆ ՍՈՂԵԼԻ ՄԱՍԻՆ

Դիտարկվում են առաձգական համակարգի տատանումները լրացուցիչ, ոչ գծային դիմադրության առկայության դեպքում: Ստացված են արտաքին և ներքին ուժերի ու դրանց հարաբերության փոփոխման օրենքները, առավելագույն լարումների հաշվման բանաձևեր: Թվային օրինակի միջոցով ցույց է տրված, որ նշված մոդելի ճիշտ կիրառումը կարող է հանգեցնել լարումների զգալի փոքրացման:

Առանցքային բառեր. մոդել, ռեոլոգիա, լարում, դիմադրություն, տատանում:

S.S. DARBINYAN

ON RHEOLOGICAL MODEL OF VIBRATIONS THEORY

Vibrations of the elastic system in case of additional nonlinear resistance are considered. We get the variation laws of inner and outer forces and their connections. The formula for the calculation of maximum exertion is obtained. It is shown through a digital example that in case of correct usage of the abovementioned model a considerable reduction of tension may occur.

Keywords: model, reology, tension, resistance, vibration.

С.Р. МЕСЧЯН, К.А. ТАСЛАГЯН

УСТРОЙСТВА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГРУНТОВ МЕТОДОМ КРУЧЕНИЯ ОБРАЗЦОВ В КИНЕМАТИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ

Приведены описания устройств М-11 и М-12, предназначенных для определения реологических свойств грунтов методом кручения образцов в кинематическом режиме. В первом случае кручение образцов создается при помощи разрывной машины, а во втором случае – тяговым агрегатом. Устройство М-12 можно использовать как в лабораторных, так и в полевых условиях.

Ключевые слова: испытательные устройства, испытание грунтов кручением.

Одним из основных режимов испытания грунтов на сдвиг является кинематический, т.е. режим контроля касательных напряжений. Данный режим удобно использовать при кручении образцов под действием нормальных давлений. Это позволяет осуществить испытание образцов как при различных скоростях деформирования, так и при больших деформациях кручения (сдвига) с фиксацией пиковой τ_p и остаточной τ_r прочностей грунта, а также определить его вязкостные свойства.

Для осуществления испытания образцов глинистых грунтов на сдвиг в кинематическом режиме создано устройство М-11 (рис. 1) [1] на основе компоновки устройства М-5 (показано в правой части рисунка) с разрывной машиной М-5 Ивановского завода испытательных приборов (показано в левой части рисунка).

В устройстве М-11 окруженный набором защитных колец образец грунта 1 диаметром 101 мм и высотой 24 мм, помещенный в рабочем органе 2, уплотняется нормальной нагрузкой винтовым приводом 3 или рычажным прессом (на рисунке не показано), вмонтированным на верхнем ригеле 4 двухъярусной рамы. Нормальная нагрузка передается на образец грунта через динамометр 5, шток-шпиндель 6 механизма кручения и перфорированно-рифленый штамп.

Крутящий момент, передающийся образцу грунта через шток-шпиндель 6 и перфорированно-рифленый штамп, создается закручиванием диска 7 механизма кручения тягой 8. Тяга одним концом закреплена в канавке диска 7, посредством динамометра горизонтального усилия 10 перекинута через ролик 11 кронштейна 12, вмонтированного на стойке разрывной машины, и закреплена на ее подвижном траверсе 9.

Скорость испытания образца на кручение реализуется разрывной машиной.

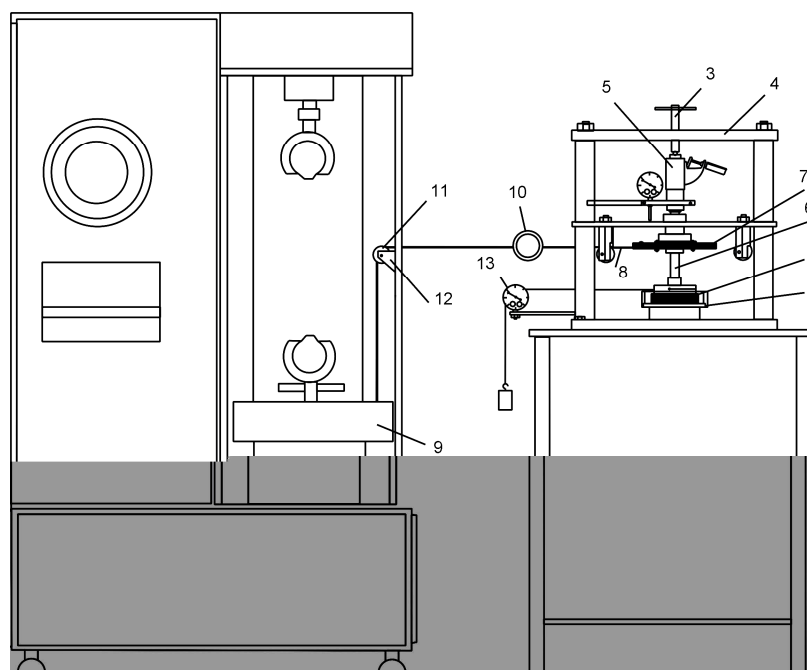


Рис. 1

При малых скоростях закручивания ($0,01...1,0 \text{ } ^\circ/\text{мин}$) образца горизонтальное усилие, созданное разрывной машиной, замеряется динамометром ДПУ или динамометром сжатия ДОСМ с использованием реверсора. При больших скоростях испытания образцов это усилие замеряется электротензометрическим динамометром, соединенным с электронным регистратором. Деформация кручения образца замеряется прогибомером 13 (рис.1).

Эксплуатация устройства М-11 показала предельно простую работу и большую надежность получаемых результатов. Оно обладает большими возможностями, в частности, учитывает влияние на реологические свойства грунтов самых различных факторов. Вместе с тем следует отметить ограниченность его применения из-за отсутствия во многих геотехнических лабораториях разрывных машин. Поэтому и возникла идея создания нового устройства, позволяющего освободиться от необходимости разрывной машины.

В связи с вышеизложенным на базе устройства М-5 [1,2] нами создано устройство М-12 (рис.2), которое отличается от предыдущего методом создания крутящего момента и кинематическим режимом испытания образцов на прочность, осуществляемыми их кручением.

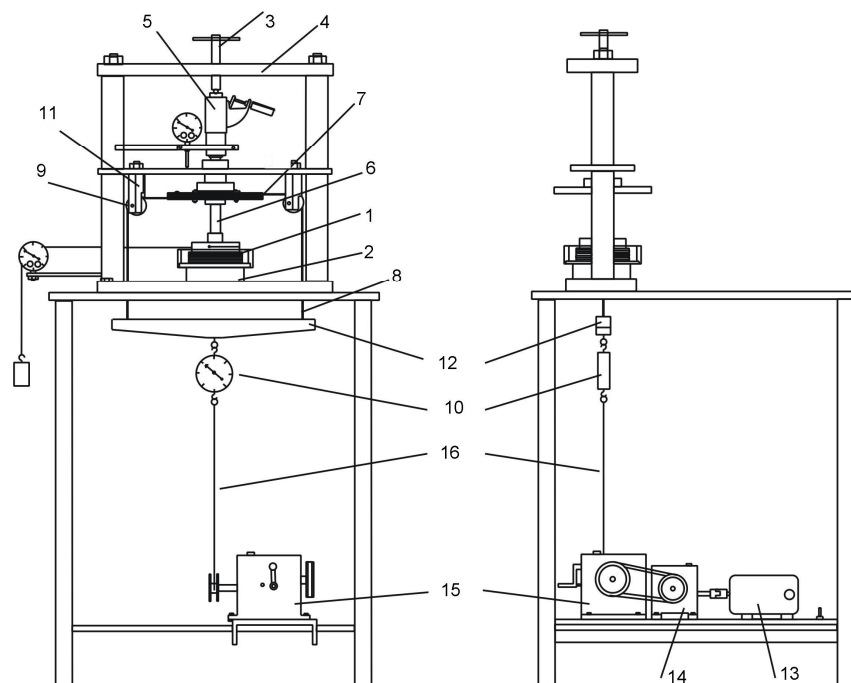


Рис. 2

В устройстве М-5 [1,2], как известно, крутящий момент создается закручиванием диска 7 парой тяг 8, помещенных и закрепленных в его двух канавках. Тяги перекинuty через ролики 9 кронштейнов 11 и закреплены на балочке 12 механизма кручения, на котором подвешен грузовой поддон (на рис. 2 не показано). Усилия в тягах 8 создаются массой гирь, уложенных на грузовом поддоне.

В устройстве М-12, в отличие от изложенного выше, усилия в тягах 8 создаются тяговым агрегатом (рис. 2), помещенным под столиком устройства. Агрегат состоит из электродвигателя 13, спаренного с первым редуктором 14 с редукцией 1:16 и вторым редуктором 15 с редукцией 1:340, соединенный с первым редуктором ременной передачей. Намотка на моховике второго редуктора 15 гибкой тяги 16 через динамометр 10 подвешивается на балочке 12 механизма кручения.

Скорость испытания образца грунта на кручение регулируется скоростью намотки на моховик редуктора 15 гибкой тяги 16 специальным пультом управления.

Тарировки устройств М-11 и М-12 осуществляются точно так же, как тарировка устройства М-5, подробно описанная в [1,2].

Зная величины крутящих моментов $M_{\text{тор}}$, соответствующие пиковой и остаточной деформациям сдвига (закручивания) образца с учетом тарировочных поправок, пиковую τ_p и остаточную τ_r прочности грунта определяют по следующему выражению [2]:

$$\tau(\tau_p, \tau_r) = \frac{3M_{\text{тор}}}{2\pi r^3},$$

где r - радиус образца.

Отметим, что устройства могут быть легко приспособлены для испытания на кручение кольцевых образцов глинистых грунтов.

Проверка применимости устройства М-12 для определения прочностных свойств грунтов осуществлена сопоставительным определением на устройстве М-11 различных грунтов, обладающих различными составами и состояниями. Ниже приведены результаты испытания на остаточную прочность (сопротивление сдвигу) суглинка ($W_0=0,259$; $\rho=2,04$; $\rho_s=2,71$; $W_L=0,338$; $W_P=0,198$; $I_P=0,14$) под действием трех нормальных напряжений: $\sigma=0,1$; $0,2$ и $0,3$ МПа. Полученные опытные данные остаточной прочности грунта и параметры его сопротивления сдвигу приведены в таблице, а графики зависимости $\tau_r=f(\sigma)$ - на рис. 3.

Таблица

Устройство М-11		Устройство М-12	
σ , МПа	τ_r , МПа	σ , МПа	τ_r , МПа
0,1	0,0445	0,1	0,054
0,1	0,04	0,1	0,035
0,2	0,0738	0,2	0,090
0,2	0,076	0,2	0,078
0,3	0,1197	0,3	0,126
0,3	0,1331	0,3	0,124
C	-0,0029	C	0,004
tgφ	0,4207	tgφ	0,4025
φ ⁰	22,78	φ ⁰	21,92

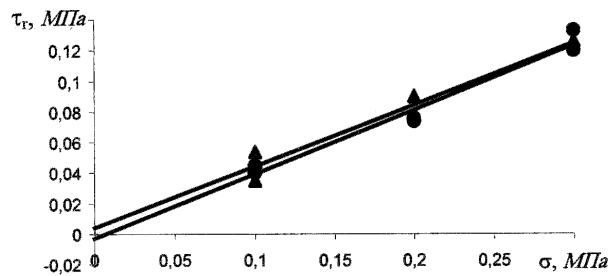


Рис. 3

Как видно из таблицы и рис. 3, при испытании образцов-близнецов грунта с двукратным повторением опытов на устройствах М-11 и М-12 получены совершенно близкие, практически совпадающие результаты. Это значит, что устройство М-12 может быть успешно использовано для определения прочностных и других реологических свойств грунтов.

Данные таблицы показывают также практическое равенство нулю параметра C закона Кулона ($\tau=\sigma \text{tg}\varphi+C$) при остаточной прочности глинистых грунтов, определяемой при больших деформациях сдвига (закручивания) [3].

В заключение отметим, что устройство М-12 может быть успешно использовано для определения прочностных и деформационных свойств грунтов (глинистых и песчаных) не только в лабораторных, но и в полевых условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Месчян С.Р.** Механические свойства грунтов и лабораторные методы их определения. - М.: Недра, 1974.- 192 с.
2. **Месчян С.Р.** Экспериментальная реология глинистых грунтов. - М.: Недра, 1995. - 342 с.
3. **Месчян С.Р.** Прочность глинистых грунтов при больших деформациях сдвига // ОФМГ.– 2003. - N 3 – С. 10-14.

Ин-т механики НАН РА. Материал поступил в редакцию 29.10.2004.

Ս.Ռ. ՄԵՍՉՅԱՆ, Կ.Ա. ԹԱՍԼԱԳՅԱՆ

**ԿԻՆԵՄԱՏԻԿԱԿԱՆ ՌԵԺԻՄՈՎ ԿԱՎԱՅԻՆ ԳԵՏՆԱՀՈՂԵՐԻ ՌԵՈԼՈԳԻԱԿԱՆ
ՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԸ ՓՈՐՁԱՆՄՈՒՇՆԵՐԻ ՈԼՈՐՄԱՆ ԵՂԱՆԱԿՈՎ ՈՐՈՇՈՂ ԿԱՅԱՆՔՆԵՐ**

Նկարագրված է կավային գետնահողերի ռեոլոգիական հատկությունները ոլորման եղանակով, կինեմատիկական ռեժիմով որոշող Մ-11 կայանքը, որտեղ ոլորող մոմենտը ստեղծվում է խզող մեքենայի միջոցով, ինչպես նաև Մ-12 կայանքը, որտեղ ոլորող մոմենտը ստեղծվում է նրա սեղանի տակ տեղակայված ձգող ագրեգատի միջոցով: Վերջինիս առավելությունն այն է, որ պարտադիր չէ խզող մեքենայի առկայությունը և կարող է օգտագործվել թե(լաբորատոր, թե(դաշտային պայմաններում: Բերված են ենթակավի փորձանմուշների՝ Մ-11 և Մ-12 կայանքներում ամրության փորձարկման արդյունքները, որոնք գործնականորեն չեն տարբերվում:

Առանցքային բառեր. գետնահողերի ոլորման փորձարկում, փորձասարքեր:

S.R. MESCHYAN, K.A. TASLAGYAN

**UNIT FOR SPECIFYING REOLOGICAL PROPERTIES OF GROUNDS BY SAMPLE TORSION
METHOD IN KINEMATICAL CONDITION**

Description of units M-11 and M-12 designated for defining the reological ground properties by sample torsion method in the kinematic condition is given. In the first case the sample twist is created by the tearing machine, and, in the second case, by the thrust unit. The unit M-12 can be used both in laboratory and field conditions.

Keywords: ground test by twist, pilot ground test by twist, pilot units.

В.С. ХАЧАТРЯН К. В. ХАЧАТРЯН, С. Э. ГРИГОРЯН, А.Г. ГУЛЯН

РАСЧЕТ ДОПУСТИМОГО УСТАНОВИВШЕГОСЯ РЕЖИМА ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПРИ P-Q, P-U ТИПАХ СТАНЦИОННЫХ УЗЛОВ

Предлагается метод расчета допустимого установившегося режима ЭЭС при P-Q и P-U типах станционных узлов.

Ключевые слова: система, матрица, станция, оптимизация, допустимый установившийся режим, модель, мощность, модуль, аргумент, узел.

Проблема расчета установившегося и допустимого установившегося режимов является началом решения множества режимных вопросов электроэнергетической системы (ЭЭС) [1-14]. В настоящее время оптимизация режимов ЭЭС осуществляется либо по P, либо по P-Q или P-U параметрам электрических станций. Однако большое теоретическое и практическое значение имеет проблема оптимизации режима ЭЭС одновременно по P-Q и по P-U параметрам электрических станций. В связи с этим приобретает также большое значение проблема расчета допустимого установившегося режима одновременно по P-Q и P-U типам станционных узлов, который рассматривается как дооптимальный режим при оптимизации режима ЭЭС.

С целью построения соответствующей математической модели принимается следующая система индексов: $m(n) = 0, 1, 2, \dots, \Gamma_1$ где Γ_1 - число станционных узлов типа P-Q. Станционный узел с нулевым индексом выбирается в качестве базисного (балансирующего); $k(\ell) = \Gamma_1 + 1, \Gamma_1 + 2, \dots, \Gamma_1 + \Gamma_2$, где Γ_2 - число станционных узлов типа P-U; $i(j) = \Gamma + 1, \Gamma + 2, \dots, \Gamma + N$, где N - число нагрузочных узлов типа P-Q, причем $\Gamma = \Gamma_1 + \Gamma_2$ и $\Gamma + N = M$.

Как можно заметить, рассматриваемая ЭЭС состоит из $M+1$ узлов и, следовательно, из M независимых узлов.

При этом математическую модель допустимого установившегося режима ЭЭС при Y форме задания состояния сети можно представить в виде

$$\Phi_p(U, \Psi_u) = \begin{cases} \Phi_{pm}(U, \Psi_u) = P_m - \phi_{pm}(U_n, \Psi_{un}; U_\ell, \Psi_{u\ell}; U_j, \Psi_{uj}) = 0, \\ \Phi_{pk}(U, \Psi_u) = P_k - \phi_{pk}(U_n, \Psi_{un}; U_\ell, \Psi_{u\ell}; U_j, \Psi_{uj}) = 0, \\ \Phi_{pi}(U, \Psi_u) = P_i - \phi_{pi}(U_n, \Psi_{un}; U_\ell, \Psi_{u\ell}; U_j, \Psi_{uj}) = 0; \end{cases} \quad (1)$$

$$\Phi_q(U, \Psi_u) = \begin{cases} \Phi_{qm}(U, \Psi_u) = Q_m - \varphi_{qm}(U_n, \Psi_{un}; U_\ell, \Psi_{u\ell}; U_j, \Psi_{uj}) = 0, \\ \Phi_{qk}(U, \Psi_u) = Q_k - \varphi_{qk}(U_n, \Psi_{un}; U_\ell, \Psi_{u\ell}; U_j, \Psi_{uj}) = 0, \\ \Phi_{qi}(U, \Psi_u) = Q_i - \varphi_{qi}(U_n, \Psi_{un}; U_\ell, \Psi_{u\ell}; U_j, \Psi_{uj}) = 0; \end{cases} \quad (2)$$

$$U_{n,\min} \leq U_n \leq U_{n,\max}, \quad (3)$$

$$Q_{n,\min} \leq Q_n \leq Q_{n,\max};$$

$$U_{\ell,\min} \leq U_\ell \leq U_{\ell,\max}, \quad (4)$$

$$Q_{\ell,\min} \leq Q_\ell \leq Q_{\ell,\max}.$$

Из приведенной математической модели (1)-(4) можно заметить, что ограничения типа неравенств (3) налагаются на станционные узлы типа P-Q, а ограничения типа (4) – на станционные узлы типа P-U.

В развернутой форме функции типа φ_p и φ_q , входящие в (1) и (2), определяются в виде

$$\begin{aligned} \varphi_{pm}(U, \Psi_u) = & U_m \left\{ \sum_{n=0}^{\Gamma_1} [g_{mn} \cos(\Psi_{Um} - \Psi_{Un}) + b_{mn} \sin(\Psi_{Um} - \Psi_{Un})] U_n + \right. \\ & + \sum_{\ell=\Gamma_1+1}^{\Gamma} [g_{m\ell} \cos(\Psi_{Um} - \Psi_{U\ell}) + b_{m\ell} \sin(\Psi_{Um} - \Psi_{U\ell})] U_\ell + \\ & \left. + \sum_{j=\Gamma+1}^M [g_{mj} \cos(\Psi_{Um} - \Psi_{Uj}) + b_{mj} \sin(\Psi_{Um} - \Psi_{Uj})] U_j \right\}, \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \varphi_{pk}(U, \Psi_u) = & U_k \left\{ \sum_{n=0}^{\Gamma_1} [g_{kn} \cos(\Psi_{Uk} - \Psi_{Un}) + b_{kn} \sin(\Psi_{Uk} - \Psi_{Un})] U_n + \right. \\ & + \sum_{\ell=\Gamma_1+1}^{\Gamma} [g_{k\ell} \cos(\Psi_{Uk} - \Psi_{U\ell}) + b_{k\ell} \sin(\Psi_{Uk} - \Psi_{U\ell})] U_\ell + \\ & \left. + \sum_{j=\Gamma+1}^M [g_{kj} \cos(\Psi_{Uk} - \Psi_{Uj}) + b_{kj} \sin(\Psi_{Uk} - \Psi_{Uj})] U_j \right\}, \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \varphi_{pi}(U, \Psi_u) = & U_i \left\{ \sum_{n=0}^{\Gamma_1} [g_{in} \cos(\Psi_{Ui} - \Psi_{Un}) + b_{in} \sin(\Psi_{Ui} - \Psi_{Un})] U_n + \right. \\ & + \sum_{\ell=\Gamma_1+1}^{\Gamma} [g_{i\ell} \cos(\Psi_{Ui} - \Psi_{U\ell}) + b_{i\ell} \sin(\Psi_{Ui} - \Psi_{U\ell})] U_\ell + \\ & \left. + \sum_{j=\Gamma+1}^M [g_{ij} \cos(\Psi_{Ui} - \Psi_{Uj}) + b_{ij} \sin(\Psi_{Ui} - \Psi_{Uj})] U_j \right\}, \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned}
\varphi_{qm}(U, \Psi_u) = & U_m \left\{ \sum_{n=0}^{\Gamma_1} [g_{mn} \sin(\Psi_{Um} - \Psi_{Un}) - b_{mn} \cos(\Psi_{Um} - \Psi_{Un})] U_n + \right. \\
& + \sum_{\ell=\Gamma_1+1}^{\Gamma} [g_{m\ell} \sin(\Psi_{Um} - \Psi_{U\ell}) - b_{m\ell} \cos(\Psi_{Um} - \Psi_{U\ell})] U_\ell + \\
& \left. + \sum_{j=\Gamma+1}^M [g_{mj} \sin(\Psi_{Um} - \Psi_{Uj}) - b_{mj} \cos(\Psi_{Um} - \Psi_{Uj})] U_j \right\},
\end{aligned} \tag{8}$$

$$\begin{aligned}
\varphi_{qk}(U, \Psi_u) = & U_k \left\{ \sum_{n=0}^{\Gamma_1} [g_{kn} \sin(\Psi_{Uk} - \Psi_{Un}) - b_{kn} \cos(\Psi_{Uk} - \Psi_{Un})] U_n + \right. \\
& + \sum_{\ell=\Gamma_1+1}^{\Gamma} [g_{k\ell} \sin(\Psi_{Uk} - \Psi_{U\ell}) - b_{k\ell} \cos(\Psi_{Uk} - \Psi_{U\ell})] U_\ell + \\
& \left. + \sum_{j=\Gamma+1}^M [g_{kj} \sin(\Psi_{Uk} - \Psi_{Uj}) - b_{kj} \cos(\Psi_{Uk} - \Psi_{Uj})] U_j \right\},
\end{aligned} \tag{9}$$

$$\begin{aligned}
\varphi_{qi}(U, \Psi_u) = & U_i \left\{ \sum_{n=0}^{\Gamma_1} [g_{in} \sin(\Psi_{Ui} - \Psi_{Un}) - b_{in} \cos(\Psi_{Ui} - \Psi_{Un})] U_n + \right. \\
& + \sum_{\ell=\Gamma_1+1}^{\Gamma} [g_{i\ell} \sin(\Psi_{Ui} - \Psi_{U\ell}) - b_{i\ell} \cos(\Psi_{Ui} - \Psi_{U\ell})] U_\ell + \\
& \left. + \sum_{j=\Gamma+1}^M [g_{ij} \sin(\Psi_{Ui} - \Psi_{Uj}) - b_{ij} \cos(\Psi_{Ui} - \Psi_{Uj})] U_j \right\}.
\end{aligned} \tag{10}$$

Предположим, все независимые узлы являются узлами типа P-Q, при этом необходимо определить аргументы и модули комплексных напряжений тех же узлов. Для определения вышеотмеченных неизвестных на основании метода Ньютона-Рафсона можно написать следующее рекуррентное выражение:

$$\begin{bmatrix} \frac{\Psi_{um}}{U_m} \\ \frac{\Psi_{uk}}{U_k} \\ \frac{\Psi_{ui}}{U_i} \end{bmatrix}^{I+1} = \begin{bmatrix} \frac{\Psi_{um}}{U_m} \\ \frac{\Psi_{uk}}{U_k} \\ \frac{\Psi_{ui}}{U_i} \end{bmatrix}^I - \begin{bmatrix} \frac{\Delta\Psi_{um}}{\Delta U_m} \\ \frac{\Delta\Psi_{uk}}{\Delta U_k} \\ \frac{\Delta\Psi_{ui}}{\Delta U_i} \end{bmatrix}, \tag{11}$$

где I – номер итерации.

Приращения $\Delta\Psi_{um}$, $\Delta\Psi_{uk}$, $\Delta\Psi_{ui}$, а также ΔU_m , ΔU_k и ΔU_i определяются на основании следующего матричного уравнения:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_m \\ \text{-----} \\ \Delta Q_m \\ \text{-----} \\ \Delta P_k \\ \text{-----} \\ \Delta Q_k \\ \text{-----} \\ \Delta P_i \\ \text{-----} \\ \Delta Q_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial \Psi_{un}} & \frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial U_n} & \frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial \Psi_{u\ell}} & \frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial U_\ell} & \frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial \Psi_{uj}} & \frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial U_j} \\ \frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial \Psi_{un}} & \frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial U_n} & \frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial \Psi_{u\ell}} & \frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial U_\ell} & \frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial \Psi_{uj}} & \frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial U_j} \\ \frac{\partial \Phi_{pk}}{\partial \Psi_{un}} & \frac{\partial \Phi_{pk}}{\partial U_n} & \frac{\partial \Phi_{pk}}{\partial \Psi_{u\ell}} & \frac{\partial \Phi_{pk}}{\partial U_\ell} & \frac{\partial \Phi_{pk}}{\partial \Psi_{uj}} & \frac{\partial \Phi_{pk}}{\partial U_j} \\ \frac{\partial \Phi_{qk}}{\partial \Psi_{un}} & \frac{\partial \Phi_{qk}}{\partial U_n} & \frac{\partial \Phi_{qk}}{\partial \Psi_{u\ell}} & \frac{\partial \Phi_{qk}}{\partial U_\ell} & \frac{\partial \Phi_{qk}}{\partial \Psi_{uj}} & \frac{\partial \Phi_{qk}}{\partial U_j} \\ \frac{\partial \Phi_{pi}}{\partial \Psi_{un}} & \frac{\partial \Phi_{pi}}{\partial U_n} & \frac{\partial \Phi_{pi}}{\partial \Psi_{u\ell}} & \frac{\partial \Phi_{pi}}{\partial U_\ell} & \frac{\partial \Phi_{pi}}{\partial \Psi_{uj}} & \frac{\partial \Phi_{pi}}{\partial U_j} \\ \frac{\partial \Phi_{qi}}{\partial \Psi_{un}} & \frac{\partial \Phi_{qi}}{\partial U_n} & \frac{\partial \Phi_{qi}}{\partial \Psi_{u\ell}} & \frac{\partial \Phi_{qi}}{\partial U_\ell} & \frac{\partial \Phi_{qi}}{\partial \Psi_{uj}} & \frac{\partial \Phi_{qi}}{\partial U_j} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \Psi_{um} \\ \text{-----} \\ \Delta U_m \\ \text{-----} \\ \Delta \Psi_{uk} \\ \text{-----} \\ \Delta U_k \\ \text{-----} \\ \Delta \Psi_{ui} \\ \text{-----} \\ \Delta U_i \end{bmatrix}, \quad (12)$$

где

$$\begin{cases} \Delta P_m = P_m - \Phi_{pm}(U_n, \Psi_{un}; U_\ell, \Psi_{u\ell}; U_j, \Psi_{uj}) = \Phi_{pm}, \\ \Delta P_k = P_k - \Phi_{pk}(U_n, \Psi_{un}; U_\ell, \Psi_{u\ell}; U_j, \Psi_{uj}) = \Phi_{pk}, \\ \Delta P_i = P_i - \Phi_{pi}(U_n, \Psi_{un}; U_\ell, \Psi_{u\ell}; U_j, \Psi_{uj}) = \Phi_{pi}; \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} \Delta Q_m = Q_m - \Phi_{qm}(U_n, \Psi_{un}; U_\ell, \Psi_{u\ell}; U_j, \Psi_{uj}) = \Phi_{qm}, \\ \Delta Q_k = Q_k - \Phi_{qk}(U_n, \Psi_{un}; U_\ell, \Psi_{u\ell}; U_j, \Psi_{uj}) = \Phi_{qk}, \\ \Delta Q_i = Q_i - \Phi_{qi}(U_n, \Psi_{un}; U_\ell, \Psi_{u\ell}; U_j, \Psi_{uj}) = \Phi_{qi}. \end{cases} \quad (14)$$

Частные производные, входящие в матрицу Якоби выражения (12), определяются нижеприведенными формулами:

- при одинаковых индексах:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Phi_{p\lambda}}{\partial \Psi_{u\lambda}} &= Q_\lambda + b_{\lambda\lambda} U_\lambda^2, & \frac{\partial \Phi_{q\lambda}}{\partial \Psi_{u\lambda}} &= -P_\lambda + g_{\lambda\lambda} U_\lambda^2, \\ \frac{\partial \Phi_{p\lambda}}{\partial U_\lambda} &= -\frac{P_\lambda}{U_\lambda} - g_{\lambda\lambda} U_\lambda^2, & \frac{\partial \Phi_{q\lambda}}{\partial U_\lambda} &= -\frac{Q_\lambda}{U_\lambda} + b_{\lambda\lambda} U_\lambda^2; \end{aligned} \quad (15)$$

- при разных индексах:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \Phi_{p\lambda}}{\partial \Psi_{u\mu}} &= -[g_{\lambda\mu} \sin(\Psi_{u\lambda} - \Psi_{u\mu}) - b_{\lambda\mu} \cos(\Psi_{u\lambda} - \Psi_{u\mu})] U_{\lambda} U_{\mu}, \\
\frac{\partial \Phi_{q\lambda}}{\partial \Psi_{u\mu}} &= -[g_{\lambda\mu} \cos(\Psi_{u\lambda} - \Psi_{u\mu}) - b_{\lambda\mu} \sin(\Psi_{u\lambda} - \Psi_{u\mu})] U_{\lambda} U_{\mu}, \\
\frac{\partial \Phi_{p\lambda}}{\partial U_{\mu}} &= -[g_{\lambda\mu} \cos(\Psi_{u\lambda} - \Psi_{u\mu}) - b_{\lambda\mu} \sin(\Psi_{u\lambda} - \Psi_{u\mu})] U_{\lambda}, \\
\frac{\partial \Phi_{q\lambda}}{\partial U_{\mu}} &= -[g_{\lambda\mu} \sin(\Psi_{u\lambda} - \Psi_{u\mu}) - b_{\lambda\mu} \cos(\Psi_{u\lambda} - \Psi_{u\mu})] U_{\lambda},
\end{aligned} \tag{16}$$

где

$$\lambda = (m, k, i), \quad \mu = (n, \ell, j). \tag{17}$$

После обращения квадратной неособенной матрицы Якоби выражения (12) имеем

$$\begin{bmatrix} \frac{\Delta \Psi_{um}}{\Delta U_m} \\ \frac{\Delta \Psi_{uk}}{\Delta U_k} \\ \frac{\Delta \Psi_{ui}}{\Delta U_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_{mn} & \beta_{mn} & \alpha_{m\ell} & \beta_{m\ell} & \alpha_{mj} & \beta_{mj} \\ \delta_{mn} & \gamma_{mn} & \delta_{m\ell} & \gamma_{m\ell} & \delta_{mj} & \gamma_{mj} \\ \alpha_{kn} & \beta_{kn} & \alpha_{k\ell} & \beta_{k\ell} & \alpha_{kj} & \beta_{kj} \\ \delta_{kn} & \gamma_{kn} & \delta_{k\ell} & \gamma_{k\ell} & \delta_{kj} & \gamma_{kj} \\ \alpha_{in} & \beta_{in} & \alpha_{i\ell} & \beta_{i\ell} & \alpha_{ij} & \beta_{ij} \\ \delta_{in} & \gamma_{in} & \delta_{i\ell} & \gamma_{i\ell} & \delta_{ij} & \gamma_{ij} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{\Delta P_m}{\Delta Q_m} \\ \frac{\Delta P_k}{\Delta Q_k} \\ \frac{\Delta P_i}{\Delta Q_i} \end{bmatrix}. \tag{18}$$

Здесь $\alpha, \beta, \delta, \gamma$ являются подматрицами обращенной матрицы.

Матричное уравнение (18) получено для случая, когда все независимые стационарные узлы являются типа P-Q. Однако, согласно постановке задачи, стационарные узлы с индексами $k(\ell)$ являются узлами типа P-U, в силу чего можем написать

$$[\Delta U_k] = 0. \tag{19}$$

В результате матричное выражение (18) принимает вид

$$\begin{bmatrix} \frac{\Delta \Psi_{um}}{\Delta U_m} \\ \frac{\Delta \Psi_{uk}}{\Delta U_k} \\ 0 \\ \frac{\Delta \Psi_{ui}}{\Delta U_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_{mn} & \beta_{mn} & \alpha_{m\ell} & \beta_{m\ell} & \alpha_{mj} & \beta_{mj} \\ \delta_{mn} & \gamma_{mn} & \delta_{m\ell} & \gamma_{m\ell} & \delta_{mj} & \gamma_{mj} \\ \alpha_{kn} & \beta_{kn} & \alpha_{k\ell} & \beta_{k\ell} & \alpha_{kj} & \beta_{kj} \\ \delta_{kn} & \gamma_{kn} & \delta_{k\ell} & \gamma_{k\ell} & \delta_{kj} & \gamma_{kj} \\ \alpha_{in} & \beta_{in} & \alpha_{i\ell} & \beta_{i\ell} & \alpha_{ij} & \beta_{ij} \\ \delta_{in} & \gamma_{in} & \delta_{i\ell} & \gamma_{i\ell} & \delta_{ij} & \gamma_{ij} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{\Delta P_m}{\Delta Q_m} \\ \frac{\Delta P_k}{\Delta Q_k} \\ \frac{\Delta P_i}{\Delta Q_i} \end{bmatrix}. \tag{20}$$

Представим матричное уравнение (20) в виде совокупности следующих трех подматричных уравнений:

$$\begin{bmatrix} \frac{\Delta\Psi_{um}}{\Delta\Psi_{uk}} \\ \frac{\Delta\Psi_{ui}}{\Delta U_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_{mn} & \beta_{mn} & \alpha_{m\ell} & \beta_{m\ell} & \alpha_{mj} & \beta_{mj} \\ \alpha_{kn} & \beta_{kn} & \alpha_{k\ell} & \beta_{k\ell} & \alpha_{kj} & \beta_{kj} \\ \alpha_{in} & \beta_{in} & \alpha_{i\ell} & \beta_{i\ell} & \alpha_{ij} & \beta_{ij} \\ \delta_{in} & \gamma_{in} & \delta_{i\ell} & \gamma_{i\ell} & \delta_{ij} & \gamma_{ij} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{\Delta P_m}{\Delta Q_m} \\ \frac{\Delta P_k}{\Delta Q_k} \\ \frac{\Delta P_i}{\Delta Q_i} \end{bmatrix}, \quad (21)$$

$$[\Delta U_m] = [\delta_{mn} \mid \gamma_{mn} \mid \delta_{m\ell} \mid \gamma_{m\ell} \mid \delta_{mj} \mid \gamma_{mj}] \cdot \begin{bmatrix} \frac{\Delta P_m}{\Delta Q_m} \\ \frac{\Delta P_k}{\Delta Q_k} \\ \frac{\Delta P_i}{\Delta Q_i} \end{bmatrix}, \quad (22)$$

$$[0] = [\delta_{kn} \mid \gamma_{kn} \mid \delta_{k\ell} \mid \gamma_{k\ell} \mid \delta_{kj} \mid \gamma_{kj}] \cdot \begin{bmatrix} \frac{\Delta P_m}{\Delta Q_m} \\ \frac{\Delta P_k}{\Delta Q_k} \\ \frac{\Delta P_i}{\Delta Q_i} \end{bmatrix}. \quad (23)$$

Матричное выражение (23) принимает вид

$$[0] = [\delta_{kn}] \cdot [\Delta P_m] + [\delta_{kn}] \cdot [\Delta Q_m] + [\delta_{k\ell}] \cdot [\Delta P_k] + [\gamma_{k\ell}] \cdot [\Delta Q_k] + [\delta_{kj}] \cdot [\Delta P_i] + [\gamma_{kj}] \cdot [\Delta Q_i]. \quad (24)$$

Из (24) можно установить следующее:

$$[\Delta Q_k] = -[\gamma_{k\ell}] \cdot [\Delta k], \quad (25)$$

где

$$[\Delta k] = -\{[\delta_{kn}] \cdot [\Delta P_m] + [\delta_{kn}] \cdot [\Delta Q_m] + [\delta_{k\ell}] \cdot [\Delta P_k] + [\delta_{kj}] \cdot [\Delta P_i] + [\gamma_{kj}] \cdot [\Delta Q_i]\}. \quad (26)$$

Имея предварительные численные значения приращений ΔP_m , ΔQ_m , ΔP_k , ΔP_i и ΔQ_i , на основании (25) устанавливаем численные значения реактивных мощностей:

$$[\Delta Q_k] = [\Delta Q_{\Gamma_1+1}, \Delta Q_{\Gamma_1+2}, \dots, \Delta Q_{\Gamma}]. \quad (27)$$

Определим действительные значения реактивных мощностей для станционных узлов с индексом $k(\ell)$, пользуясь вторым выражением из (14):

$$Q_k = \Delta Q_k + \varphi_{qk}. \quad (28)$$

Устанавливая численные значения реактивных мощностей станционных

узлов типа P-U с индексом $k(\ell)$, проверяем условия их допустимости согласно требованию:

$$Q_{k,\min} \leq Q_k \leq Q_{k,\max}. \quad (29)$$

Затем устанавливаем численные значения модулей комплексных напряжений станционных узлов типа P-Q с индексами $m(n)$.

На основании вторых строчек выражений (11) и (18) можем написать

$$[U_m]^{I+1} = [U_m]^I - \begin{bmatrix} \delta_{mn} & \gamma_{mn} & \delta_{m\ell} & \gamma_{m\ell} & \delta_{mj} & \gamma_{mj} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{\Delta P_m}{\Delta Q_m} \\ \frac{\Delta P_k}{\Delta Q_k} \\ \frac{\Delta P_i}{\Delta Q_i} \end{bmatrix}. \quad (30)$$

Имея предварительные численные значения приращений $\Delta P_m, \Delta Q_m, \Delta P_k, \Delta P_i$ и ΔQ_i , согласно (13) и (14), на основании (30) устанавливаем численные значения модулей напряжений станционных узлов типа P-Q, т.е. для узлов с индексами $m(n)$:

$$[U_m] = [U_1, U_2, \dots, U_{\Gamma_1}]. \quad (31)$$

Устанавливая численные значения модулей комплексных напряжений станционных узлов типа P-Q, проверяем условие их допустимости, т.е. условие

$$U_{m,\min} \leq U_m \leq U_{m,\max}. \quad (32)$$

При проверке условий допустимости (29) и (32) могут быть случаи, когда:

1. Условия (29) и (32) полностью обеспечиваются, и на основании (21) устанавливаются численные значения $\Delta \Psi_{um}, \Delta \Psi_{uk}, \Delta \Psi_{ui}$ и ΔU_i . Затем, пользуясь нижеприведенным рекуррентным выражением, вычисляются действительные значения режимных параметров:

$$\begin{bmatrix} \frac{\Psi_{um}}{\Psi_{uk}} \\ \frac{\Psi_{U\ell}}{U_i} \end{bmatrix}^{I+1} = \begin{bmatrix} \frac{\Psi_{um}}{\Psi_{uk}} \\ \frac{\Psi_{U\ell}}{U_i} \end{bmatrix}^I - \begin{bmatrix} \frac{\Delta \Psi_{um}}{\Delta \Psi_{uk}} \\ \frac{\Delta \Psi_{U\ell}}{\Delta U_i} \end{bmatrix}. \quad (33)$$

В результате для станционных узлов типа P-Q определяем Ψ_{um}, U_m , а для станционных узлов типа P-U - Ψ_{uk}, Q_k . Разумеется, для нагрузочных узлов определяем аргументы и модули комплексных напряжений.

Этим завершается первая итерация. Вторая итерация осуществляется аналогичным образом. Если в последующих итерациях удовлетворяются условия (29) и (32), то итерационный процесс считается завершенным при

обеспечении условий

$$\begin{aligned} |P_m - \varphi_{pm}(U, \Psi)| &\leq \Delta P_m, \\ |P_k - \varphi_{pk}(U, \Psi)| &\leq \Delta P_k, \end{aligned} \quad (34)$$

$$\begin{aligned} |P_i - \varphi_{pi}(U, \Psi)| &\leq \Delta P_i; \\ |Q_m - \varphi_{qm}(U, \Psi)| &\leq \Delta Q_m, \\ |Q_k - \varphi_{qk}(U, \Psi)| &\leq \Delta Q_k, \\ |Q_i - \varphi_{qi}(U, \Psi)| &\leq \Delta Q_i, \end{aligned} \quad (35)$$

где $\Delta P_m, \Delta P_k, \Delta P_i; \Delta Q_m, \Delta Q_k, \Delta Q_i$ – заданные положительные величины, характеризующие точность установления значения искомых режимных параметров. Для ослабления условия сходимости принимается:

$$\begin{aligned} \Delta P_m &= \Delta P_k = \Delta P_i = \Delta P, \\ \Delta Q_m &= \Delta Q_k = \Delta Q_i = \Delta Q. \end{aligned} \quad (36)$$

2. Условие (29) не удовлетворяется, а условие (32) удовлетворяется. Это означает, что реактивные мощности станционных узлов типа P-U могут быть либо больше допустимых максимальных значений ($Q_{k,max}$), либо меньше допустимых минимальных значений ($Q_{k,min}$). При этом станционные узлы P-U заменяются на станционные узлы типа P-Q, причем в первом случае – на $P-Q_{m,max}$, а во втором – на $P-Q_{m,min}$. В результате все независимые станционные узлы становятся узлами типа P-Q, и итерационный процесс осуществляется на основании рекуррентного выражения (11), определяя неизвестные значения модулей и аргументов комплексных напряжений.

Этим завершается первая итерация, аналогичным образом осуществляется вторая.

Итерационный процесс считается завершенным, если обеспечиваются также условия сходимости (34) и (35).

3. Условие (29) удовлетворяется, а условие (32) – нет. Это означает, что условия ограничений типа неравенств, налагаемые на станционные узлы типа P-U, удовлетворяются, а условия ограничений типа неравенств, налагаемые на станционные узлы типа P-Q, не удовлетворяются.

При этом может быть, что для станционных узлов типа P-Q модули комплексных напряжений либо больше допустимых максимальных значений ($U_{m,max}$), либо меньше допустимых минимальных значений ($U_{m,min}$). Станционные узлы с индексами $m(n)$ типа P-Q можно заменить на станционные узлы типа P-U, причем в первом случае – на $P-U_{m,max}$, а во втором случае – на $P-U_{m,min}$.

В результате все независимые станционные узлы становятся узлами

типа P-U. При этом можем написать

$$[\Delta U_m] = 0, \quad (37)$$

$$[U_k] = 0. \quad (38)$$

В силу этого матричное уравнение (18) принимает вид

$$\begin{bmatrix} \frac{\Delta \Psi_{um}}{0} \\ \frac{\Delta \Psi_{uk}}{0} \\ \frac{\Delta \Psi_{ui}}{\Delta U_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_{mn} & \beta_{mn} & \alpha_{m\ell} & \beta_{m\ell} & \alpha_{mj} & \beta_{mj} \\ \delta_{mn} & \gamma_{mn} & \delta_{m\ell} & \gamma_{m\ell} & \delta_{mj} & \gamma_{mj} \\ \alpha_{kn} & \beta_{kn} & \alpha_{k\ell} & \beta_{k\ell} & \alpha_{kj} & \beta_{kj} \\ \delta_{kn} & \gamma_{kn} & \delta_{k\ell} & \gamma_{k\ell} & \delta_{kj} & \gamma_{kj} \\ \alpha_{in} & \beta_{in} & \alpha_{i\ell} & \beta_{i\ell} & \alpha_{ij} & \beta_{ij} \\ \delta_{in} & \gamma_{in} & \delta_{i\ell} & \gamma_{i\ell} & \delta_{ij} & \gamma_{ij} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{\Delta P_m}{\Delta Q_m} \\ \frac{\Delta P_k}{\Delta Q_k} \\ \frac{\Delta P_i}{\Delta Q_i} \end{bmatrix}. \quad (39)$$

Представим полученное матричное уравнение (39) в виде совокупности следующих двух подматричных уравнений, причём первое является (21), а второе будет

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta_{mn} & \gamma_{mn} \\ \delta_{kn} & \gamma_{kn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{\Delta P_m}{\Delta P_k} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \delta_{m\ell} & \gamma_{m\ell} \\ \delta_{k\ell} & \gamma_{k\ell} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{\Delta Q_m}{\Delta Q_k} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \delta_{mj} & \gamma_{mj} \\ \delta_{kj} & \gamma_{kj} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{\Delta P_i}{\Delta Q_i} \end{bmatrix}. \quad (40)$$

Из выражения (40) можно установить:

$$\begin{bmatrix} \frac{\Delta Q_m}{\Delta Q_k} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \delta_{m\ell} & \gamma_{m\ell} \\ \delta_{k\ell} & \gamma_{k\ell} \end{bmatrix}^{-1} \left\{ \begin{bmatrix} \delta_{mn} & \gamma_{mn} \\ \delta_{kn} & \gamma_{kn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{\Delta P_m}{\Delta P_k} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \delta_{mj} & \gamma_{mj} \\ \delta_{kj} & \gamma_{kj} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{\Delta P_i}{\Delta Q_i} \end{bmatrix} \right\}. \quad (41)$$

Имея предварительные численные значения приращений $\Delta P_m, \Delta P_k; \Delta P_i, \Delta Q_i$, на основании (13) и последнего выражения (14) матричное выражение (41) позволяет установить численные значения приращений ΔQ_m и ΔQ_k :

$$\Delta Q_m = (Q_1, Q_2, \dots, Q_{\Gamma_1}), \quad (42)$$

$$\Delta Q_k = (Q_{\Gamma_1+1}, Q_{\Gamma_1+2}, \dots, Q_{\Gamma}). \quad (43)$$

Затем определяем действительные значения реактивных мощностей тех же узлов, пользуясь первым и вторым выражениями (14):

$$Q_m = \Delta Q_m + \Phi_{qm}, \quad (44)$$

$$Q_k = \Delta Q_k + \Phi_{qk}. \quad (45)$$

Устанавливая численные значения реактивных мощностей независимых станционных узлов, проверяем условия их допустимости:

$$Q_{m,\min} \leq Q_m \leq Q_{m,\max}, \quad (46)$$

$$Q_{k,\min} \leq Q_k \leq Q_{k,\max}. \quad (47)$$

Если условия (46) и (47) обеспечиваются, то это означает, что ограничения типа неравенств, налагаемые на станционные узлы типа P-U, обеспечиваются, и можно установить другие неизвестные режимные

параметры на основании рекуррентного выражения (33). Этим завершается первая итерация, после чего необходимо перейти к осуществлению второй итерации. Если во второй и последующих итерациях удовлетворяются условия (46) и (47), то необходимо завершить расчет допустимого установившегося режима. Решение задачи завершается при обеспечении условий сходимости (34), (35).

4. Условия (29) и (32) не обеспечиваются. Это означает, что ограничения типа неравенств, налагаемые как на станционные узлы типа P-Q, так и на станционные узлы типа P-U, не обеспечиваются.

При этом для станционных узлов типа P-Q модули комплексных напряжений могут получаться больше допустимых максимальных значений ($U_{m,max}$) или меньше допустимых минимальных значений ($U_{m,min}$). С другой стороны, для станционных узлов типа P-U реактивные мощности могут получаться больше допустимых ($Q_{k,max}$) или меньше допустимых ($Q_{k,min}$) значений.

В этом случае станционные узлы типа P-Q необходимо заменить на станционные узлы типа P-U, а станционные узлы типа P-U - на узлы типа P-Q.

В первом случае будем иметь ($P - U_{max}$) или ($P - U_{min}$), а во втором - ($P - Q_{max}$) или ($P - Q_{min}$).

Нетрудно заметить, что если поменять индексы $m(n)$ на $k(\ell)$ или наоборот, то получим первый случай, т.е. станционные узлы с индексами $m(n)$ являются узлами типа P-U, а станционные узлы с индексами $k(\ell)$ - узлами типа P-Q.

Таким образом, задача расчета допустимого установившегося режима ЭЭС решается итерационным методом при замене станционных узлов типа P-Q на станционные узлы типа P-U, и наоборот.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Хачатрян В.С., Эгмекчян Э.А.** Развитие гибридного метода расчета установившегося режима электрической системы // Электричество.-1991.-N 1.- С. 6-13.
2. **Хачатрян В.С., Ибрахим А.И., Хачатрян К.В.** Метод определения допустимого установившегося режима электроэнергетической системы. // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН.-1998.-Т. 51, N 3.-С. 295-300.
3. **Каримян А.С.** Расчет допустимого установившегося режима электроэнергетической системы при Y – форме задания состояния сети // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН.-1999.-Т. 52, N 1.-С. 43-50.
4. **Хачатрян К.В., Нашат А.А., Мкртчян Г.С.** Расчет допустимого установившегося режима Z эквивалентированной электроэнергетической системы // Моделирование, оптимизация, управление: Сборник научных трудов.-2000.- Вып. 3.- С. 103-108.
5. **Хачатрян К.В., Борян А.В.** Новый метод коррекции установившегося режима электроэнергетической системы // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН.-2002.-Т. 55, N 2.-С. 222-230.
6. **Хачатрян К.В., Борян А.В.** Коррекция установившегося режима электроэнергетической

- системы при P-U и P-Q типе станционных узлов // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН.-2003.-Т. 56, N 1.-С. 86-93.
7. **Хачатрян В.С., Бадалян Н.П., Гулян А.Г.** Выбор состава уравнений установившегося режима электроэнергетической системы при P-U и P-Q типе станционных узлов // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН.-2003.- Т. 56, N 2.-С. 272-281.
 8. **Сафарян В.С., Григорян С.Э.** Расчет допустимого установившегося режима электроэнергетической системы при Y-Z форме задания состояния сети // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН.-2003.-Т. 56, N 3.-С. 417-425.
 9. **Мнацаканян М.А.** Расчет допустимого установившегося режима ЭЭС методом декомпозиции // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН.-2004.-Т. 57, N 1.-С. 83-93.
 10. **Григорян С.Э.** Новый метод расчета допустимого установившегося режима ЭЭС // Вестник МАНЕБ. - СПб, 2004.-N 3.-С. 69-73.
 11. **Хачатрян К.В., Гладунчик Е.А., Мнацаканян М.А., Тохунц А.Р.** Минимизация потерь активной мощности в сетях электроэнергетической системы // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН.-2004.-Т. 57, N 3.-С. 434-444.
 12. **Хачатрян В.С., Мнацаканян М.А.** Определение допустимых относительных приростов потерь активной мощности ЭЭС методом декомпозиции // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН.- 2005.-Т. 58, N 1.- С. 260-268.
 13. **Хачатрян К.В.** Метод коррекции установившегося режима электроэнергетической системы // Электричество.-2005.-N 5.-С. 8-13.
 14. **Бадалян Н.П.** Реализация математической модели установившегося режима электроэнергетической системы // Электричество.- 2005.-N 6.- С. 33-40.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 10.08.2005.

Վ.Ս. ԽԱՉԱՏՐՅԱՆ, Կ.Վ. ԽԱՉԱՏՐՅԱՆ, Ս.Է. ԳՐԻԳՈՐՅԱՆ, Ա.Գ. ՂՈՒԼՅԱՆ
ԷԼԵԿՏՐԱԷՆԵՐԳԵՏԻԿԱԿԱՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳԻ ԹՈՒՅԼԱՏՐԵԼԻ ԿԱՅՈՒՆԱՑՎԱԾ ՌԵԺԻՄԻ ՀԱՇՎՈՒՄԸ P-Q, P-
U ՏԵՍՔԻ ԿԱՅԱՆԱՅԻՆ ՀԱՆԳՈՒՑՆԵՐԻ ԴԵՊՔՈՒՄ

Առաջարկվում է ԷԷՀ-ի թույլատրելի կայունացված ռեժիմի հաշվում էլեկտրական ցանցի Y տեսքի տրման դեպքում, երբ կայանային հանգույցները միաժամանակ P-Q և P-U տեսքերի են:

Առանցքային բառեր. համակարգ, մատրից, կայան, թույլատրելի կայունացված ռեժիմ, մոդել, հզորություն, մոդուլ, արգումենտ, հանգույց:

V.S. KHACHATRYAN, K.V. KHACHATRYAN, S.E. GRIGORYAN, A.G.GHULYAN
DESIGN OF PERMISSIBLE STEADY-STATE CONDITION OF ELECTRICAL POWER SYSTEM
FOR P-Q, P-U TYPES OF STATION UNITS

The method for design of permissible steady-state electrical power system for P-Q, and P-U types of station units is proposed.

Keywords: system, matrix, station, optimization, permissible, steady-state condition, model, power, module, argument, unit.

С.А. МИНАСЯН, Э.К. АРАКЕЛЯН, Г.Э. АГАБАБЯН

МЕТОДИКА ВЫБОРА СОСТАВА ГЕНЕРИРУЮЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ КОНДЕНСАЦИОННЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ И ОПТИМАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ МЕЖДУ НИМИ ПРИ ПОКРЫТИИ СУТОЧНЫХ ГРАФИКОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ

Предложена методика выбора состава генерирующего оборудования конденсационных электростанций (КЭС) и оптимального распределения электрической нагрузки между энергоблоками при покрытии суточных графиков электрической нагрузки, учитывающая индивидуальные характеристики каждого энергоблока по экономичности, надежности и маневренности. Приведена блок-схема алгоритма оптимального распределения нагрузки с оптимизацией текущих параметров энергоблоков.

Ключевые слова: график электрической нагрузки, резервирование агрегатов, оптимизация режимов.

При переходе энергетики на рыночные отношения вопросы экономии топлива и электроэнергии приобретают особую важность в связи с тем, что в себестоимости выработки электроэнергии на КЭС топливные затраты составляют 70...80 %. Хотя проблема минимизации топливных затрат при покрытии суточных графиков электропотребления в технической литературе всегда обсуждалась достаточно широко [1-3], вместе с тем новые условия требуют более действенных алгоритмов с учетом факторов экономичности, надежности, маневренности и реального состояния оборудования. В [4] приведена общая методика многокритериальной оптимизации покрытия суточных графиков электрической нагрузки с учетом реальных динамических энергетических характеристик оборудования ТЭС. Решение задачи предлагается провести в три этапа: на первом этапе в результате рассмотрения долгосрочных режимов работы оборудования КЭС, с учетом факторов экономичности и надежности, на конкурсной основе выбирается порядок расположения агрегатов при покрытии суточного графика нагрузки; на втором этапе рассматриваются недельные графики нагрузки с целью предварительной оптимизации состава генерирующего оборудования; на третьем этапе на основе результатов первых двух этапов производится оптимизация суточных режимов работы оборудования ТЭС с учетом факторов маневренности и реального состояния оборудования.

Ниже приводится описание методики выбора состава генерирующего оборудования и оптимального распределения электрической нагрузки между ними (3-й этап).

При рассмотрении задачи приняты следующие исходные положения:

- рассматривается КЭС с блочным оборудованием;

- суточный график электрической нагрузки считается заданным по результатам предварительного распределения нагрузок на уровне энергосистемы;
- энергетические характеристики энергоблоков задаются для каждого энергоблока индивидуально;
- пошаговое точное покрытие заданного суточного графика нагрузки считается обязательным условием, в том числе в часы спада и подъема нагрузки;
- по результатам выполнения первых двух этапов задачи, как было указано выше, агрегаты при покрытии суточного графика нагрузки располагаются в определенном порядке;
- способы резервирования каждого энергоблока и их энергетические показатели (характеристики) считаются известными.

Постановка задачи. Для заданного суточного графика электрической нагрузки в каждый момент времени (τ) требуется найти состав генерирующего оборудования и оптимальное распределение активной нагрузки N_τ между ними таким образом, чтобы обеспечить точное покрытие графика с минимальными затратами на топливо за сутки в целом, т.е.

$$Z_{\text{ст}}^c = C_\tau \left[\sum_{i=1}^n [B_{ic}(N_i) + \Delta B_{ip}(\tau_p)] \right] \rightarrow \min, \quad (1)$$

где $Z_{\text{ст}}^c$ - суммарные затраты на топливо на станции за сутки; $B_{ic}(N_i)$ - расход топлива на i -ом агрегате на выработку электроэнергии за сутки; ΔB_{ip} - потери топлива на i -ом агрегате при его резервировании на время (τ_p); C_τ - стоимость топлива; $i = 1, 2, \dots, n$ - число энергоблоков на станции.

Расход топлива на i -ом агрегате на выработку электроэнергии определяется как

$$B_i(N_i) = \int_0^{\tau_{ri}} b_i(N_i) N_{i\tau} d\tau, \quad (2)$$

где τ_{ri} - время работы i -го агрегата в режиме генерации электроэнергии; $b_i(N_i)$ - удельный расход топлива на i -ом агрегате как функция от текущей нагрузки; $N_{i\tau}$ - нагрузка агрегата в момент времени τ .

Потери топлива на i -ом агрегате в период его резервирования составляют

$$\Delta B_{ip}(\tau_p) = \sum_{k=1}^{\bar{k}} \int_0^{\tau_{ipk}} \Delta B_{ip}(l_{ip}) d\tau_p, \quad (3)$$

где τ_{ipk} - время работы i -го агрегата в k -ом способе резервирования; $\Delta B_{ip}(l_{ip})$ - потери топлива в l -ом способе резервирования за единицу времени; $\bar{k}$ - способы резервирования в течение суток.

Уравнения (1)-(3) рассматриваются при следующих балансовых уравнениях и ограничениях:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^n (N_{i\tau} - N_{i,ч.т}) - N_{ст.т} = 0, \\ N_i^{\min} \leq N_i \leq N_i^{\max}, \\ \sum_{i=1}^n B_{i\tau}(N_{i\tau}) = B_{ст.т} \leq B_{ст.т}^{\max}, \\ L_{kp} \in [ОПР, МР, РР_{\min}, ГВР, Р_{сн}, \dots], \end{array} \right. \quad (4)$$

где $N_{i\tau}$, $N_{i,ч.т}$ - текущая нагрузка i - го агрегата и мощность его электрических собственных нужд; $N_i^{\min}$, $N_i^{\max}$ - ограничения по минимуму и максимуму мощности i - го агрегата; $B_{i\tau}(N_{i\tau})$ - расход топлива на i - ом агрегате; $B_{ст.т}$, $B_{ст.т}^{\max}$ - расход топлива на станции в момент времени (и допустимая его величина (если такое ограничение существует); L_{kp} - имеющиеся в распоряжении персонала возможные способы резервирования мощности k - го резервируемого агрегата из числа: ОПР – остановочно-пусковой режим; МР – моторный режим; $РР_{\min}$ – режим минимальных нагрузок (15-20% от N_n); ГВР – горячевращающийся режим; $Р_{сн}$ – режим собственных нужд и др.

Решение поставленной задачи в таком виде требует большого числа расчетов, если принять часовой интервал по времени и согласования получаемых решений по нагрузке и способам резервирования на каждом последующем шаге.

Для сокращения расчетов суточный график нагрузки представим в виде двух зон с разгрузкой, провалом и нагружением в каждой зоне (рис.1). В первую зону включается максимум нагрузки, ночной провал и утренний подъем нагрузки. Во вторую зону включается дневной провал и вечернее нагружение. Оптимизация режимов проводится в каждой зоне графика с согласованием режимов работы оборудования по зонам между собой.

В первой зоне покрытие максимума нагрузки, как было указано выше, производится распределением агрегатов в определенном порядке. Рассмотрим порядок оптимизации при минимальной нагрузке (N_r , рис. 1).

Для удобства расчетов и в предположении, что все энергоблоки работают на одном виде топлива (заменяя минимум затрат на топливо на минимум расхода топлива), выражение (1) представим в виде

$$B_{ст.пп}^c = \sum_{i=1}^n B_i(N_i, \tau_{пп}) + \sum_{k=1}^{n_p} \Delta B_k(\tau_{пп}), \quad (5)$$

где n_r, n_p - число генерируемых и резервируемых энергоблоков; $B_i(N_i, \tau_{np})$ - расход топлива на i - ом генерируемом энергоблоке; $\Delta B_k(\tau_{np})$ - потери топлива на k - ом резервируемом агрегате.

Число генерируемых агрегатов во время провала нагрузки определяется исходя из величин N_r и ограничений на технический минимум энергоблока:

$$n'_r = \left(\frac{N_r}{N_{\text{тех. min}}} \right),$$

округленное до целого числа в сторону увеличения.

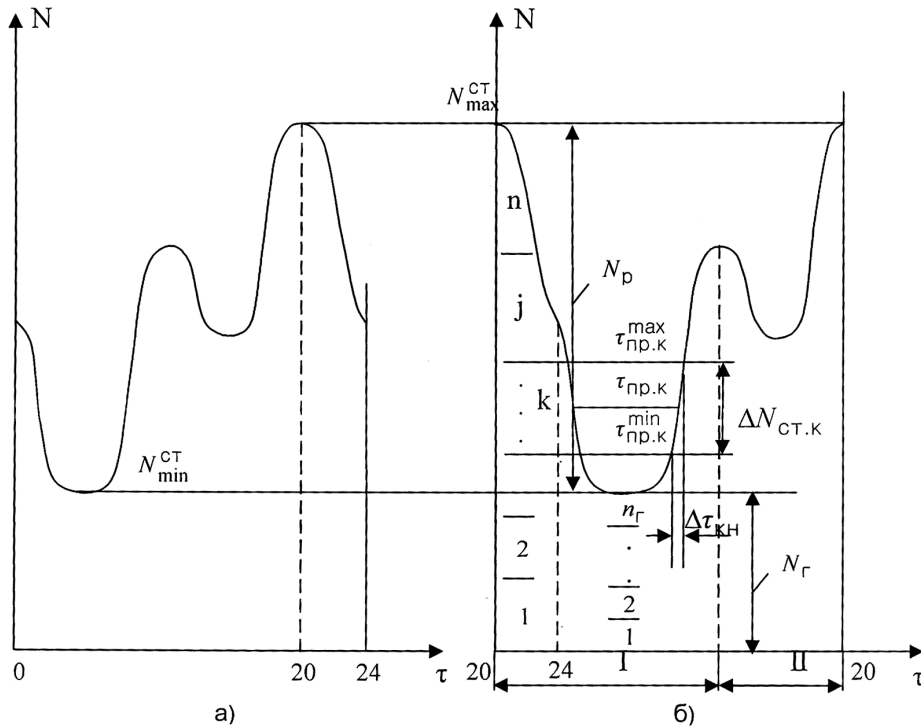


Рис. 1. Характерный суточный график нагрузки: а - принятый вид, б - рассматриваемый вид

В качестве резервируемых агрегатов (по числу $n - n'_r$) рассматриваются агрегаты, занимающие пиковую и полупиковую части графика нагрузки, генерирующие агрегаты, расположенные в базисной и полубазисной частях графика (по результатам 1 - го этапа расчетов).

Очевидно, что резервируемые агрегаты в зоне разгрузки станции $N_p = N_{\text{max}}^{\text{CT}} - N_r$ располагаются в том же порядке, как и при покрытии

максимума нагрузки, следовательно, для каждого из них известна величина $\tau_{\text{пр}k}$ (рис. 1б)

$$\tau_{\text{пр}k} = \frac{1}{2}(\tau_{\text{пр}k}^{\max} + \tau_{\text{пр}k}^{\min}),$$

и способ их резервирования можно определить по методике, изложенной в [4], но с учетом фактора маневренности, для чего потери топлива при 1 – ом способе резервирования вычисляются по выражению

$$\Delta B_k(l)_{\text{пр}} = \Delta B_k(l, \tau_{\text{пр}}) + \Delta B_{kw}(l),$$

где $\Delta B_k(l, \tau_{\text{пр}})$ – потери топлива на k – ом агрегате при 1 – ом способе резервирования как функция от $\tau_{\text{пр}}$, без учета фактора маневренности; $\Delta B_{kw}(l)$ – дополнительные потери, учитывающие фактор маневренности:

$$\Delta B_{kw}(l) = \begin{cases} 0, & \text{если } W_{\text{нк}} \geq W_{\text{н.ст.к}}; \\ \Delta B_{kw}^{\text{ст}}, & \text{если } W_{\text{нк}} < W_{\text{н.ст.к}}. \end{cases}$$

Здесь $W_{\text{нк}}$ – допустимая скорость нагружения k -го агрегата при выходе из 1-го способа резервирования; $W_{\text{н.ст.к}}$ – требуемая скорость нагружения по графику нагружения станции в период нагружения k -го агрегата, т.е.

$$W_{\text{н.ст.к}} = \frac{\Delta N_{\text{ст.к}}}{\Delta \tau_{\text{к.н}}},$$

где $\Delta N_{\text{ст.к}}, \Delta \tau_{\text{к.н}}$ – величина и время изменения нагрузки станции в зоне расположения k -го агрегата.

При таком подходе преимуществом пользуются те способы резервирования, которые обладают большой маневренностью (РР, МР) и тем самым могут обеспечить требуемые по системным условиям графики нагружения станции.

Для определения $\Delta B_{kw}^{\text{ст}}$ в случае $W_{\text{нк}} < W_{\text{н.ст.к}}$ применяют следующую методику.

На рис.2 приведены графики нагружения станции (линия АС) и нагружения k -го энергоблока после вывода из резерва с максимально допустимой скоростью (линия АВ). Так как при этом $W_k < W_{\text{ст}}$, то это приводит к недопустимому недоотпуску электроэнергии (площадь треугольника АВС), вследствие чего необходим опережающий вывод k -го энергоблока из резерва на время, соответствующее отрезку DA, или

$$\Delta \tau_{\text{оп.к}} = \tau_{\text{н.к}}^{\text{д}} - \tau_{\text{н.ст}} = \frac{N_k}{W_{\text{к.н}}^{\text{доп}}} - \frac{N_k}{W_{\text{ст}}} = N_k \left(\frac{1}{W_{\text{к.н}}^{\text{доп}}} - \frac{1}{W_{\text{ст}}} \right),$$

где $\tau_{н.к}^д$, $\tau_{н.ст}$ - время нагружения k -го энергоблока и требуемое время его нагружения по суточному графику; $W_{к.н}^{доп}$, $W_{ст}$ - соответствующие скорости нагружения.

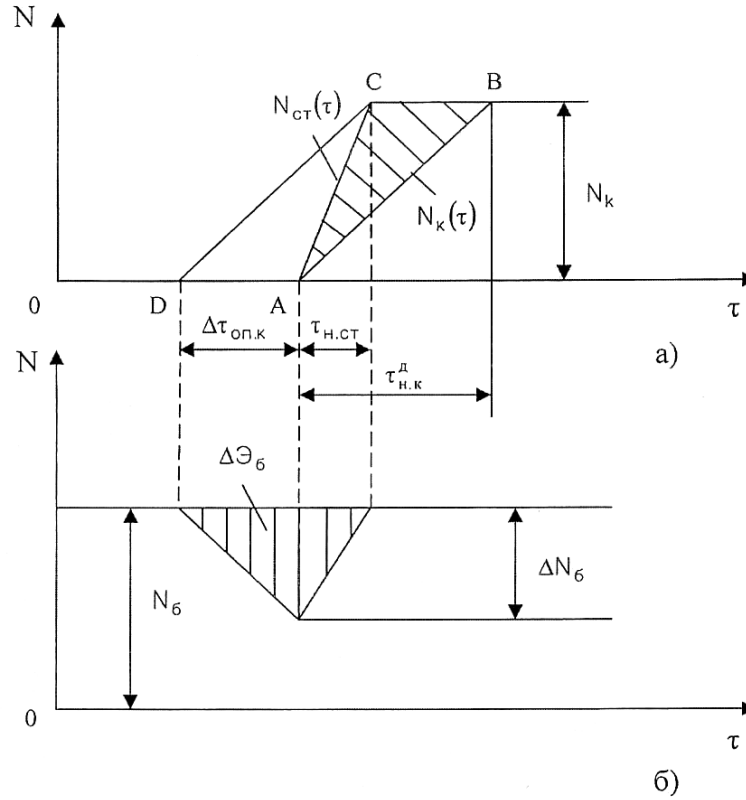


Рис. 2. К определению $\Delta B_{кв}^{ст}$: а - график нагружения k -го агрегата при выходе из резерва, б - график изменения нагрузки «базисного» разгружаемого агрегата

При опережающем пуске и нагружении k -го энергоблока (линия DC на рис. 2а) получаем избыток мощности и электроэнергии (площадь треугольника DAC), который также недопустим. Исходя из этого, принимаем, что производится вынужденная разгрузка одного из нижерасположенных блоков с последующим его нагружением (рис 2б). Величина разгрузки «базисного» блока определяется как

$$\Delta N_б = \frac{\Delta \Theta_б}{\Delta \tau_{оп} + \Delta \tau_{н.ст}} = \frac{N_k \Delta \tau_{оп}}{2(\Delta \tau_{оп} + \Delta \tau_{н.ст})} = \frac{N_k}{2} \frac{1}{\left(1 + \frac{\Delta \tau_{н.ст}}{\Delta \tau_{оп}}\right)}.$$

Потери топлива при этом можно определить по выражению

$$\Delta B_{kw}^{ст} = \Delta \mathcal{E}_{\delta} (b_{ср.к} - b_{ср.б}) + \Delta B_{нст.б} \left(\frac{\Delta N_{\delta}}{N_{\delta}} \right),$$

где $b_{ср.к}$, $b_{ср.б}$ - средний удельный расход топлива на выработку электроэнергии на k - ом блоке при нагружении и на «базисном» блоке за период его разгружения-нагружения; $\Delta B_{нст.б}$ - дополнительные потери топлива на нестационарные и переходные процессы на «базисном» блоке как функция от степени его разгружения и скорости изменения нагрузки.

Для иллюстрации на рис.3 приведены условные графики потерь топлива при резервировании двумя способами: ОПР и МР.

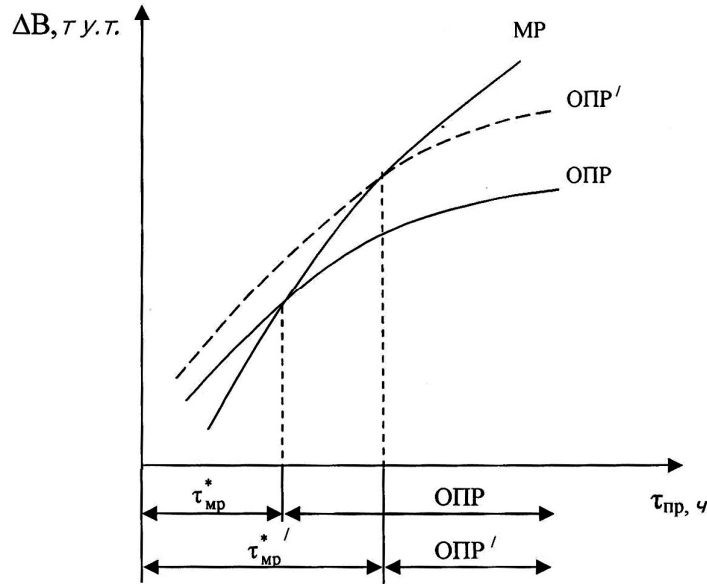


Рис. 3. Графическое определение целесообразности применения МР по сравнению с ОПР без учета и с учетом маневренности ОПР'

Для блока 200 МВт время выгоды МР по отношению к ОПР ($\tau'_{мр}$) составляет обычно 6...7 час [2], учет же маневренности при больших скоростях нагружения приводит к увеличению этой величины до 8...10 час (как правило, скорости нагружения при пуске энергоблоков после ночных остановов небольшие и значительно ниже от системных скоростей нагружения). Аналогичным образом учитывается маневренность и других способов резервирования при попарном их сравнении.

Для расчета потерь топлива при различных способах резервирования можно воспользоваться зависимостями [2]:

- для ОПР:

$$\Delta B_{\text{ОПР}} = 47,06 + 0,996\tau_p - 0,0035\tau_p^2;$$

- для МР:

$$\Delta B_{\text{МР}} = \left\{ 2,01 - 0,663P_k^{\text{нр}} + 2,653(P_k^{\text{нр}})^2 \right\} + 1,17\tau_p + 26,0 - 0,004\tau_p^2;$$

- для ГВР:

$$\Delta B_{\text{ГВР}} = 37,4 + 4,728\tau_p.$$

В приведенных выражениях $P_k^{\text{нр}} = P_k \cdot 10^2$, P_k - давление в конденсаторе, *атм*; τ_p - время резервирования, ч.

Дополнительные потери топлива на переходные и нестационарные процессы в разгрузочных режимах определяются как

$$\Delta B_{\text{нест}} = \Delta B^{\text{р.н}} + \Delta B^{\text{ст.}} = \int_0^{\tau_{\text{нест}}} B_{\text{ч}}(\tau) d\tau - B_{\text{ч.ср}} \tau_{\text{стц.}} + \Delta B_{\text{ак}}^{\text{р}},$$

где $\tau_{\text{нест.}}$, $\tau_{\text{стц.}}$ - полное время изменения нагрузки и время работы блока при стационарной (средней) нагрузке, за которое выработка электроэнергии равна суммарной выработанной электроэнергии за время $\tau_{\text{нест.}}$; $B_{\text{ч}}(\tau)$ - изменение часового расхода топлива во времени изменения нагрузки; $B_{\text{ч.ср}}$ - часовой расход топлива при средней нагрузке за период $\tau_{\text{стц.}}$; $\Delta B_{\text{ак}}^{\text{р}}$ - топливо, эквивалентное аккумулированной теплоте, полезно использованной в процессе разгрузки блока.

По регрессионным зависимостям, полученным отдельно для этапов разгрузки и нагружения, можно определить дополнительные потери топлива в зависимости от глубины $\left(\frac{\Delta N}{N_{\text{н}}} \right)$ и скорости $\left(\frac{\Delta N}{\Delta \tau} \right)$ изменения нагрузки:

$$\begin{aligned} \Delta B_{\text{нест}} \left(\frac{\Delta N}{N_{\text{н}}}, \frac{\Delta N}{\Delta \tau} \right) = & b_0 + b_1 \frac{\Delta N}{N_{\text{н}}} + b_2 \frac{\Delta N}{\Delta \tau} + b_3 \left(\frac{\Delta N}{N_{\text{н}}} \right)^2 + \\ & + b_4 \left(\frac{\Delta N}{\Delta \tau} \right)^2 + b_5 \left(\frac{\Delta N}{N_{\text{н}}} \right) \left(\frac{\Delta N}{\Delta \tau} \right), \end{aligned}$$

где коэффициенты $b_0, b_1, \dots, b_5$ для энергоблоков 150, 200 и 300 *МВт* приведены в [1].

Оптимальное распределение нагрузки между генерирующими энергоблоками в базисной части провала нагрузки производится по известным методикам, например, методом динамического программирования. Так как фактор надежности учтен на первом этапе оптимизации, а фактор маневренности – при определении способа резервирования, распределение

нагрузки может быть проведено в однокритериальной постановке, и в качестве критерия оптимизации могут служить затраты на топливо или общий расход топлива на период прохождения провала нагрузки.

Аналогично проводится оптимизация режимов для второй зоны графика нагрузки, при этом результаты расчетов 1-й зоны используются для 2-й зоны графика. Учитывается также, что при выходе из второй зоны режимы работы энергоблоков уже известны.

Для электростанций, применяющих “скользящее” резервирование, учет таких факторов, как начальное давление пара при пониженных нагрузках и давление пара в конденсаторе как следствие их технического состояния, при оптимальном распределении нагрузки является актуальным.

В этом случае предлагается алгоритм, блок-схема которого приведена на рис. 4. Алгоритм состоит из двух этапов:

- 1) предварительное распределение нагрузки без учета указанных факторов при известных функциональных зависимостях $B_i = f(N_i)$;
- 2) выбор оптимальных значений P_0 и P_k для каждого энергоблока при заданной мощности N_i , проверка возможности реализации полученных значений P_{0i} и P_{ki} (перечень оптимизируемых параметров при необходимости можно расширить), их уточнение и повторная оптимизация по зависимостям $B_i = f(N_i, P_{0i}, P_{ki})$. Итеративный процесс оптимизации продолжается до выполнения условия

$$|B_{ст}^{m+1} - B_{ст}^m| \leq \varepsilon_B,$$

где ε_B - заданная точность расчетов; m – порядковый номер текущего расчета.

Для учета реального состояния оборудования конечное решение из числа решений в интервале $B_{ст}^{\min} - \Delta B$ (где ΔB - заданный интервал рассмотрения) принимает оперативный персонал.

Таким образом, приведенная методика оптимизации суточных графиков нагрузки позволяет учесть индивидуальные характеристики каждого энергоблока по экономичности, надежности и маневренности.

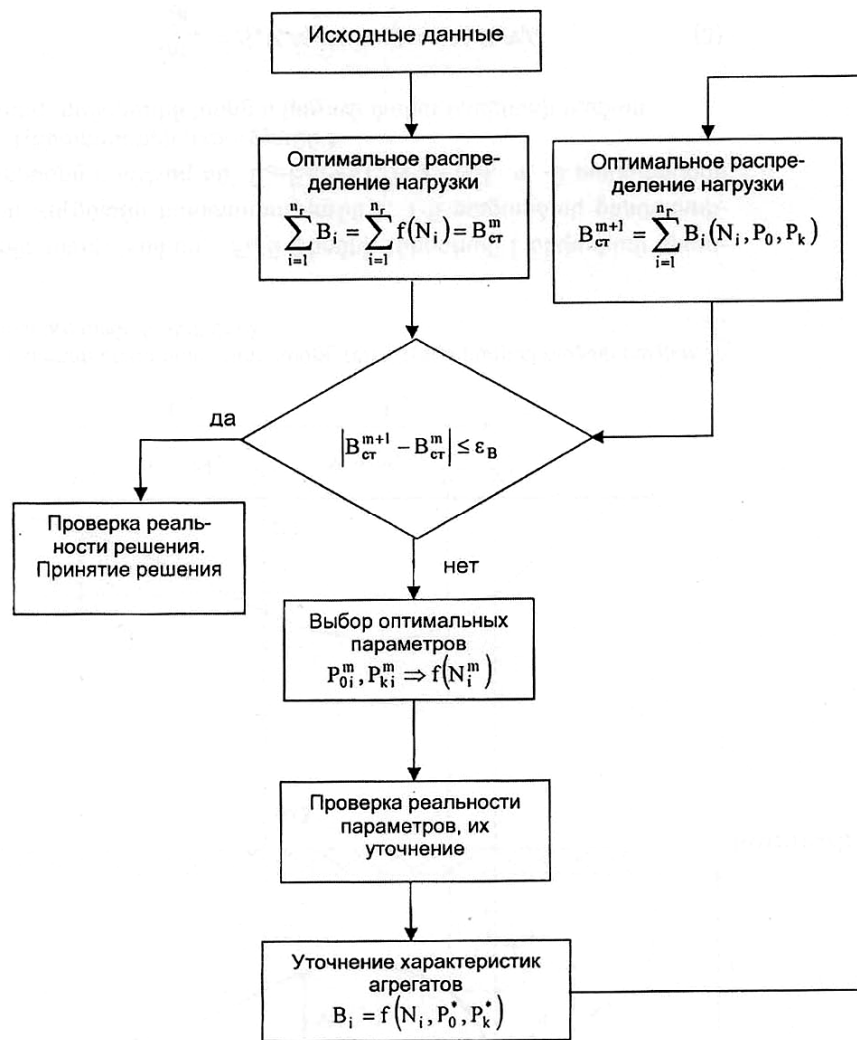


Рис. 4. Блок-схема алгоритма оптимального распределения нагрузки с оптимизацией текущих параметров блока

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Мадоян А. А., Аракелян Э. К., Минасян С. А.** Расчет нестационарных характеристик и показателей графиков электрической нагрузки и агрегатов. – Ереван: Айастан, 1989. – 135с.
2. **Аракелян Э. К., Старшинов В. А.** Повышение экономичности и маневренности оборудования тепловых электростанций. – М.: МЭИ, 1993. – 328 с.
3. **Минасян С. А.** Выбор оптимальных режимов работы ТЭС энергосистемы с учетом динамики энергетических характеристик оборудования: Автореферат дис. ... канд. техн. наук. – Ереван, 1981. – 20 с.
4. **Аракелян Э. К., Минасян С. А., Агабабян Г. Э.** Методика многокритериальной оптимизации покрытия суточных графиков электрической нагрузки с учетом реальных динамических характеристик оборудования ТЭС // Сборник докладов международной конференции “Control-2005”. – М.: МЭИ, 2005. – С. 12 – 18.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 26.09.2005.

Ս.Ա. ՄԻՆԱՍՅԱՆ, Է.Կ. ԱՌԱՔԵԼՅԱՆ, Գ. Է. ԱԴԱԲԱԲՅԱՆ

**ԿՈՆԴԵՆՍԱՑԻՈՆ ԷԼԵԿՏՐԱԿԱՅԱՆՆԵՐԻ ԳԵՆԵՐԱՑՆՈՂ ՍԱՐՔԱՎՈՐՄԱՆ ԿԱԶՄԻ
ԸՆՏՐՈՒԹՅԱՆ ԵՎ ԷՆԵՐԳԱԲԼՈՎՆԵՐԻ ՄԻՋԵՎ ԷԼԵԿՏՐԱԿԱՆ ԲԵՌՆՎԱԾՔԻ ՕՊՏԻՄԱԼ
ԲԱՇԽՄԱՆ ՄԵԹՈԴԻԿԱ՝ ՕՐԱԿԱՆ ԷԼԵԿՏՐԱԿԱՆ ԲԵՌԻ ԳՐԱՖԻԿՆԵՐԻ ԾԱԾԿՄԱՆ
ՊԱՅՄԱՆՆԵՐՈՒՄ**

Առաջարկված է ԿԷԿ-ի գեներացնող սարքավորման կազմի ընտրության և էներգաբլոկների միջև էլեկտրական բեռնվածքի օպտիմալ բաշխման մեթոդիկա՝ օրական էլեկտրական բեռի գրաֆիկների ծածկման պայմաններում, որը հաշվի է առնում առանձին էներգաբլոկների անհատական բնութագրերն ըստ խնայողականության, հուսալիության և մանևրայնության: Բերված է էներգաբլոկների միջև բեռնվածքի օպտիմալ բաշխման խնդրի ալգորիթմի բլոկ-սխեման՝ էներգաբլոկների ընթացիկ պարամետրերի լավարկմամբ:

Առանցքային բառեր. էլեկտրական բեռի գրաֆիկ, ագրեգատների ռեզերվացում, ռեժիմների լավարկում:

S.A. MINASYAN, E. K. ARAKELYAN, G. E. AGHABABYAN

**METHOD FOR THE COMPOSITION SELECTION OF CONDENSING PLANTS GENERATING
EQUIPMENT AND OPTIMAL DISTRIBUTION OF ELECTRIC LOAD AMONG POWER UNITS
WITH THE COVERAGE OF DAILY LOAD DIAGRAMS**

A method for the composition selection of CP generating equipment and optimal distribution of electric load among power units with the coverage of daily electric load diagrams taking into account individual characteristics of efficiency, reliability and cyclic load capability of each power unit is suggested. A flowchart of the algorithm for the optimal electric load distribution with the optimization of the current parameters of power units is provided.

Keywords: energy load diagram, power unit reservation, operational mode optimization.

Վ.Ս. ՍԱՖԱՐՅԱՆ, Ա.Հ. ՉԱՍՅԱՆ

**ԲԱՇԽԻՉ ՑԱՆՑԵՐՈՒՄ ԲԵՌՆՎԱԾՔՆԵՐԻ ԱԿՏԻՎ ՀԶՈՐՈՒԹՅԱՆ
ԿՈՐՈՒՍՏՆԵՐԻ ՄԱՍՆԱԲԱԺԻՆՆԵՐԻ ՈՐՈՇՈՒՄԸ**

Հետազոտվել է բաշխիչ (35/10/0,38 կՎ լարման) ցանցերում սպառիչների միջև կորուստների բաշխման խնդիրը: Առաջարկվում է սպառիչների միջև կորուստների բաշխման մեթոդ: Որոշված են բեռնվածքային հանգույցների (սպառիչների) արդյունավետության ցուցանիշները՝ ըստ ակտիվ հզորության կորստի:

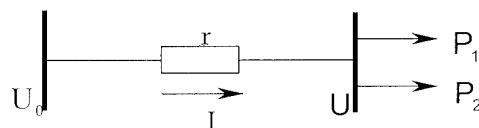
Առանցքային բառեր. տոպոլոգիա, կառուցվածքային վերլուծություն, ծառ-սխեմա, կորստի մասնաբաժին, բեռնվածքային կորուստ, պարապ ընթացքի կորուստ:

Էներգետիկայի տնտեսավարման շուկայական հարաբերությունների անցման ներկայիս պայմաններում խիստ հրատապ են էներգափոխանակման մասնակիցների միջև էլեկտրական ցանցում կորուստների բաշխումը, ինչպես նաև յուրաքանչյուր սպառիչի՝ ամեն մի կայանից ստացած ակտիվ հզորության (էներգիա) մասնաբաժինների որոշման խնդիրները:

Էլեկտրական ցանցերում կորուստների բաշխման խնդիրները դիտարկվել են [1,2] միայն բեռնվածքային կորուստների համար (առանց պարապ ընթացքի կորուստների) և միայն լարման մեկ աստիճանի էլեկտրական շղթաների դեպքում:

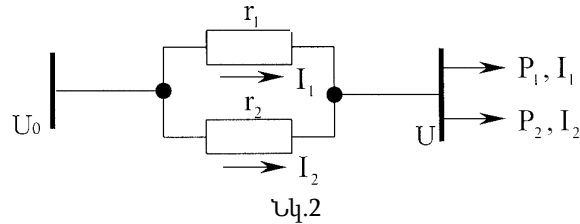
[3] հոդվածում առաջարկվում է տարանցիկ հոսքերից առաջացող էլեկտրա-էներգիայի կորուստների որոշման մեթոդ՝ հոսանքաբաշխման մատրիցի օգտագործմամբ, այսինքն՝ օգտագործվում է վերադրման սկզբունքը: Ինչպես իրավացիորեն նկատում է [3] աշխատանքի հեղինակը, տարանցիկ հոսքերի առաջացրած կորուստը չի կարելի ներկայացնել որպես ցանցում կորուստների տարբերություն՝ տրված տարանցիկ հզորության առկայության և բացակայության դեպքում, այսինքն՝ այս խնդրում վերադրման սկզբունքը կիրառելի չէ, քանի որ խնդիրը ոչ գծային է:

[4] աշխատանքում բերված են էներգափոխանակման յուրաքանչյուր մասնակցի կորստի մասնաբաժնի որոշման առնչություններ: Այդ աշխատանքում (3) բանաձևի ստացման ժամանակ հեղինակը, առանց հիմնավորման, առաջարկում է $2 W_1 W_2$ բաղադրիչը բաշխել սպառիչների ակտիվ էներգիաներին (W_1 և W_2)՝ համեմատական մասերով: Այդպիսի մոտեցումը, մեր կարծիքով, սխալ է հետևյալ նկատառումներով. Դիտարկենք նկ. 1-ում պատկերված երկու սպառիչներով հաստատուն հոսանքի էլեկտրական ցանցը.



Նկ.1

Ենթադրենք՝ ցանցի ռեժիմային պարամետրերը հայտնի են, և պահանջվում է որոշել P_1 և P_2 հզորություններով սպառիչների ստեղծած կորուստները r դիմադրությամբ տեղամասում: Ներկայացնենք սխեման այնպես (նկ. 2), որ r_1 և r_2 դիմադրություններով հոսեն համապատասխանաբար I_1 և I_2 բեռների հոսանքները:



r_1 և r_2 դիմադրությունները որոշվում են հետևյալ առնչություններով՝

$$r_1 = \frac{\Delta U}{I_1} = r \frac{I}{I_1}, r_2 = \frac{\Delta U}{I_2} = r \frac{I}{I_2}:$$

r_1 և r_2 դիմադրություններով տեղամասերի կորուստները վերագրենք համապատասխանաբար 1 և 2 սպառիչներին՝

$$\Delta P_1 = r_1 I_1^2 = r \frac{I}{I_1} I_1^2 = r I I_1 = \Delta P \frac{I_1}{I} = \Delta P \frac{P_1}{P},$$

$$\Delta P_2 = r_2 I_2^2 = r \frac{I}{I_2} I_2^2 = r I I_2 = \Delta P \frac{I_2}{I} = \Delta P \frac{P_2}{P}:$$

r դիմադրությամբ տեղամասի կորուստը՝

$$\begin{aligned} \Delta P &= r(I_1 + I_2)^2 = r(I_1^2 + 2I_1 I_2 + I_2^2) = \\ &= r(I_1^2 + I_1 I_2) + r(I_2^2 + I_1 I_2) = r I I_1 + r I I_2 = \Delta P_1 + \Delta P_2, \end{aligned}$$

այսինքն՝ $2rI_1 I_2$ բաղադրիչը բաշխվում է սպառիչների միջև հավասարապես:

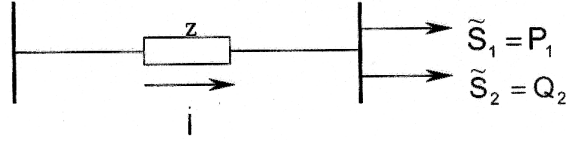
Փոփոխական հոսանքի ցանցերի դեպքում յուրաքանչյուր սպառիչի առաջացրած կորուստը կախված է ոչ միայն ակտիվ, այլև սպառիչի ռեակտիվ հզորությունից: Վերոհիշյալ առնչությունները փոփոխական հոսանքի շղթայի համար ընդունում են հետևյալ տեսքը [1]՝

$$\Delta \tilde{S}_1 = z \dot{I}_1^* = \Delta \tilde{S} \frac{\tilde{S}_1^*}{\tilde{S}}, \quad \Delta \tilde{S}_2 = z \dot{I}_2^* = \Delta \tilde{S} \frac{\tilde{S}_2^*}{\tilde{S}}:$$

Քննարկվող հոդվածում [4] բերված (1)-(6) առնչությունները ճիշտ չեն, քանի որ էներգափոխանակման մասնակիցների ստեղծած կորուստների մասնաբաժիններն արտահայտվում են միայն ակտիվ էներգիայի միջոցով:

Դիտարկենք պարզագույն էլեկտրական ցանցի հիպոթետիկ օրինակ (նկ.3), որտեղ սպառիչներից մեկը ակտիվ ($\tilde{S}_1 = P_1$), իսկ մյուսը ռեակտիվ ($\tilde{S}_2 = jQ$) բնույթի են:

Համաձայն [4] աշխատանքի (3) առնչության՝ ունենք.
 $\Delta P_1 = \Delta P$, $\Delta P_2 = 0$, այսինքն՝ երկրորդ սպառիչը ցանցում կորուստ չի ստեղծում, ինչն անընդունելի է:



Նկ.3

Համաձայն [1] աշխատանքում բերված մեթոդի՝

$$\Delta P_1 = \operatorname{Re}(\Delta \tilde{S} \frac{\tilde{S}_1}{\tilde{S}}) = \operatorname{Re}[(\Delta P + j\Delta Q) \frac{P}{P + jQ}] = P \frac{\Delta P \cdot P + \Delta Q \cdot Q}{P^2 + Q^2},$$

$$\Delta P_2 = \operatorname{Re}(\Delta \tilde{S} \frac{\tilde{S}_2}{\tilde{S}}) = \operatorname{Re}[(\Delta P + j\Delta Q) \frac{jQ}{P + jQ}] = Q \frac{\Delta P \cdot Q - \Delta Q \cdot P}{P^2 + Q^2},$$

որտեղ $P = P_1$, $Q = Q_2$:

Ստորև դիտարկվում է տարբեր լարման մակարդակ ունեցող բաշխիչ ցանցերում ակտիվ հզորության (էներգիա) բաշխումը սպառիչների միջև: Խնդրի դրվածքը հետևյալն է. բաշխիչ ցանցերի կայունացված ռեժիմի հաշվարկի արդյունքներով որոշվում են ամեն մի սպառիչի բեռնվածքային և ոչ բեռնվածքային կորուստների մասնաբաժինները, իսկ վերջիններիս միջոցով՝ նրանց արդյունավետության ցուցանիշներն՝ ըստ ակտիվ հզորության կորստի:

Առաջարկվող մեթոդը, ի տարբերություն գոյություն ունեցող [1,3] մեթոդների, թույլ է տալիս լարման տարբեր մակարդակ ունեցող բաշխիչ ցանցերում բեռնվածքային և ոչ բեռնվածքային կորուստները բաշխել սպառիչների միջև, ինչը հնարավորություն է ընձեռում յուրաքանչյուր սպառողի համար որոշել էլեկտրաէներգիայի տարբերակված սակագին:

Բաշխիչ և հաղորդող (110կՎ և բարձր) էլեկտրացանցերի տոպոլոգիական առանձնահատկությունները պահանջում են դրանց կայունացված ռեժիմների և կառուցվածքային վերլուծության [1] մեթոդների մշակման տարբեր մոտեցումներ:

Ինչպես հայտնի է, բեռների՝ ճյուղերում առաջացրած բեռնվածքային կորուստների մասնաբաժիններն ըստ բեռնվածքների, որոշվում են

$$\Delta \tilde{S}_{ij} = Z_j \dot{I}_j \dot{I}_i^* \quad (1)$$

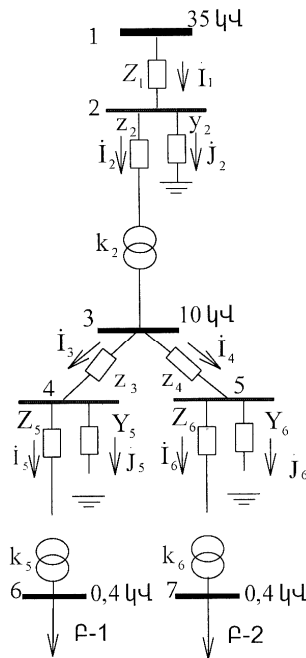
բանաձևով, որտեղ $\Delta\tilde{S}_{ij}$ -ն i -րդ բեռի՝ j -րդ ճյուղում առաջացրած բեռնվածքային կորստի մասնաբաժինն է, Z_j -ն՝ j -րդ ճյուղի կոմպլեքս դիմադրությունը, I_j -ն՝ j -րդ ճյուղի կոմպլեքս հոսանքը, I_i^* -ն՝ i -րդ բեռի համալույծ հոսանքը:

Բաշխիչ ցանցերում կորուստների բաշխման սկզբունքները դիտարկենք նկ.1-ում բերված 35/10 կՎ լարման ծառ-սխեմայի վրա:

Նկ.4-ում պատկերված էլեկտրական ցանցի փոխարինման սխեմայում, որպես նախնական տվյալներ, տրվում են գծերի և տրանսֆորմատորների կոմպլեքս դիմադրությունները (z), տրանսֆորմատորի լայնական ճյուղի կոմպլեքս հաղորդականությունը (y), տրանսֆորմատորի տրանսֆորմացիայի գործակիցը (k) և ցանցի ռեժիմային պարամետրերը:

Դիտարկենք ռադիալ (բաշխիչ) (35/10 կՎ) էլեկտրական ցանցերում գծերի և տրանսֆորմատորների բեռնվածքային և պարապ ընթացքի կորուստների բաշխման խնդիրը սպառիչների (բեռների) միջև:

Խնդրի լուծման ընթացքը կուղեկցենք նկ.4-ում պատկերված էլեկտրական ցանցի օրինակի դիտարկումով՝ առանց խեղաթուրելու խնդրի լուծման ընդհանրությունը:



Նկ. 4. 35/10 կՎ էլեկտրական ցանցի փոխարինման սխեման

Նկ. 4-ում բերված էլեկտրական ծառ-սխեմայի ճյուղերի հոսանքների միջև գոյություն ունեն հետևյալ առնչությունները.

$$\begin{aligned}\dot{I}_3 &= \dot{I}_5 + \dot{J}_5, \\ \dot{I}_4 &= \dot{I}_6 + \dot{J}_6, \\ \dot{I}_2 &= k_2(\dot{I}_3 + \dot{I}_4), \\ \dot{I}_1 &= \dot{I}_2 + \dot{J}_2:\end{aligned}$$

Ցանցի տարրերում Բ-1 և Բ-2 սպառիչների առաջացրած կորուստների կառուցվածքը ցույց է տրված աղյուսակում:

<i>Աղյուսակ</i>									
	Z_1	Z_2	Y_2	Z_3	Z_4	Z_5	Y_5	Z_6	Y_6
Բ-1	$\Delta\tilde{S}_{11}$	$\Delta\tilde{S}_{12}$	$\Delta\tilde{S}'_{12}$	$\Delta\tilde{S}_{13}$	0	$\Delta\tilde{S}_{15}$	$\Delta\tilde{S}'_{15}$	0	0
Բ-2	$\Delta\tilde{S}_{21}$	$\Delta\tilde{S}_{22}$	$\Delta\tilde{S}'_{22}$	0	$\Delta\tilde{S}_{24}$	0	0	$\Delta\tilde{S}_{26}$	$\Delta\tilde{S}'_{26}$

Աղյուսակում բերված Բ-1 և Բ-2 սպառիչների ստեղծած բեռնվածքային ($\Delta\tilde{S}_{ij}$) և ոչ բեռնվածքային $\Delta\tilde{S}'_{ij}$ կորուստների մասնաբաժինները որոշվում են հետևյալ առնչություններով.

$$\begin{aligned}\Delta\tilde{S}_{15} &= Z_5 I_5^2, \quad \Delta\tilde{S}'_{15} = Y_5 U_4^2, \quad \Delta\tilde{S}_{26} = Z_6 I_6^2, \quad \Delta\tilde{S}'_{26} = Y_6 U_5^2, \quad \Delta\tilde{S}_{13} = Z_3 I_3^2, \\ \Delta\tilde{S}_{24} &= Z_4 I_4^2,\end{aligned}$$

$$\Delta\tilde{S}_{12} = Z_2 \dot{I}_2 k_2^* I_3, \quad \Delta\tilde{S}_{22} = Z_2 \dot{I}_2 k_2^* I_4, \quad \Delta\tilde{S}'_{12} = Y_2 U_2^2 \cdot \frac{k_2^* I_3}{I_2}, \quad \Delta\tilde{S}'_{22} = Y_2 U_2^2 \cdot \frac{k_2^* I_4}{I_2},$$

$$\Delta\tilde{S}_{11} = Z_1 \dot{I}_1 (k I_3 + \frac{k_2 \dot{I}_3}{\dot{I}_2} J_2), \quad \Delta\tilde{S}_{21} = Z_1 \dot{I}_1 (k I_4 + \frac{k_2 \dot{I}_4}{\dot{I}_2} J_2):$$

Բեռնվածքային հանգույցները (սպառիչներ) որակական ցուցանիշներով գնահատելու համար որոշում ենք i -րդ սպառիչի ակտիվ հզորության սպառման մասնաբաժնի գործակիցը՝

$$K_i^P = \frac{P_i}{P}, \quad (2)$$

որտեղ P_i -ն i - րդ բեռնվածքային հանգույցի (սպառիչի) ակտիվ հզորությունն է, իսկ P - ն բոլոր բեռնվածքային հանգույցների գումարային ակտիվ հզորությունն է:

Բեռնվածքային հանգույցների (սպառիչներ) i -րդ սպառիչի ակտիվ հզորության կորստի մասնաբաժնի գործակիցը՝

$$K_i^{\Delta P} = \Delta P_i / \Delta P, \quad (3)$$

որտեղ ΔP_i - ն i - րդ բեռնվածքային հանգույցի (սպառիչի) առաջացրած կորուստն է, ΔP - ն՝ բոլոր բեռնվածքային հանգույցների (սպառիչի) կողմից առաջացրած գումարային կորուստները:

Այժմ որոշում ենք բեռների համեմատական գործակիցները .

$$K_i = \frac{K_i^P}{K_i^{\Delta P}} : \quad (4)$$

Եզրակացություններ

1. Հետազոտվել է բաշխիչ (35/10/0.38 կՎ լարման) ցանցերում կորուստների բաշխման խնդիրը սպառիչների միջև: Առաջարկվում է սպառիչների միջև կորուստների բաշխման նոր մեթոդ:

2. Որոշվում են բեռնվածքային հանգույցների (սպառիչների) արդյունավետության ցուցանիշները՝ ըստ ակտիվ հզորության կորստի:

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. **Сафарян В.С.** Структурный анализ потоков и потерь мощности в электрических цепях // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер.ТН. –2001. - Т.54, N 1. - С. 52-57.
2. **Аракелян А.М., Егиазарян Л. В., Сафарян В. С.** Расчетная доля потерь электрической мощности в ветвях электрической сети от каждой отдельной нагрузки и уравнительного тока в них // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер.ТН. –1998. - Т. 51, N 1. - С.32-38.
3. **Филиппова Т. А., Азаров В.С.** Потери электроэнергии от транзитных перетоков в электрических сетях // Электричество. - 1990.- N 4.-С.64-67.
4. **Толасов А.Г.** Потери электроэнергии и их распределение между участниками энергообмена // Электрические станции.-2002. - №1. - С.20-25.

Էներգետիկայի ԳՀԻ. Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 12.06.2003:

В. С. САФАРЯН, А. А. ЧАМЯН ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОЛИ ПОТЕРЬ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ НАГРУЗОК В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ

Исследованы вопросы распределения потерь в распределительных сетях напряжения 35/10/0,4кВ. Предлагается метод распределения потерь между потребителями. Для нагрузочных узлов (потребителей) определены показатели их эффективности по потерям активной мощности.

Ключевые слова: топология, структурный анализ, дерево-схема, доля потерь, нагрузочная потеря.

V.S. SAFARYAN, A.H. CHAMYAN DEFINITION OF ACTIVE POWER LOSS PROPORTION LOADS IN DISTRIBUTION NETWORKS

The distribution problems of losses between consumers in distribution networks of 35/10/0.4 kV voltage are studied. A method of distribution loss between consumers is proposed. For loading units (consumers) parameters of their efficiency for active power losses are determined.

Keywords: topology, structural analysis, tree-scheme, loss proportion, loading losses.

З.А. МЕЛИКЯН, В.Р. ХАРАЗЯН

ОПТИМИЗАЦИОННАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ ЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО ТЕПЛОЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ ЗДАНИЙ ОТ СТАНЦИИ С КОМБИНИРОВАННЫМ ПРОИЗВОДСТВОМ ТЕПЛА И ЭЛЕКТРИЧЕСТВА

Разработана математическая модель комплексной оптимизации комбинированной системы теплоэнергоснабжения от ТЭЦ, учитывающая влияние всех основных факторов на формирование стоимости как тепла, снабжаемого для нужд отопления зданий, так и электроэнергии.

Ключевые слова: когенерация, математическая модель, стоимость тепла, оптимальные параметры комбинированной установки.

Введение. Многие эксперты считают, что теплофикация является наиболее эффективным способом теплоснабжения, так как при этом используются тепловые выбросы производства электроэнергии. Однако для выявления реальной экономической эффективности отопления зданий на базе теплофикации нужно учесть все основные факторы и условия рыночной экономики. Для этого необходимо разработать математическую модель определения минимально возможной стоимости снабжаемой энергии при оптимальных параметрах системы в целом.

Схема теплофикационной системы производства и снабжения энергии представлена на рис.1. Система работает следующим образом: из котла 1 пар поступает в турбину 2 и, расширяясь, производит электроэнергию. Часть пара достаточно высокого давления берется из отбора 3 турбины для регенеративного подогрева питательной воды. Другая часть пара отбирается под более низким давлением P_{ex} и температурой t_{ex} 4 для подготовки горячего теплоносителя в сетевом теплообменнике 5. Третья часть пара направляется в конденсатор 6, где охлаждается водой из градирни 7. Теплоноситель из 5 с помощью насосов 8 поступает к потребителям через транзитный подающий трубопровод 9. В районных тепловых пунктах ЦТП 10 с помощью теплоносителя подготавливается горячая вода, которая подается в системы отопления зданий 11 через подающие распределительные трубопроводы 12. Охлажденная в зданиях вода по обратным распределительным трубопроводам 13 возвращается в тепловые пункты 10. Из тепловых пунктов теплоноситель по обратному транзитному трубопроводу 14 поступает в сетевой теплообменник 5 для повторного нагревания.

Взаимосвязь энергетических параметров системы и их определение. Основными энергетическими характеристиками системы являются: 1. Выработка электроэнергии N_{TTP} , кВт, на каждый кВт отпускаемого тепла ϕ . 2. Доля φ производимого в котле ТЭЦ первичного тепла Q_{in} , кВт, отпускаемая потребителям на нужды отопления Q_s , кВт.

$$\phi = N_{\text{TPP}} / Q_s, \quad (1)$$

$$\varphi = Q_s / Q_{\text{in}}. \quad (2)$$

Термический КПД теплофикационного термодинамического цикла $\eta_{\text{pp.el}}$ выражается через произведение φ и ϕ :

$$\eta_{\text{pp.el}} = N_{\text{TPP}} / Q_{\text{in}} = \varphi \phi. \quad (3)$$

Очевидно что значения коэффициентов φ , ϕ и $\eta_{\text{pp.el}}$ меняются в зависимости от температур t_{ex} пара, отбираемого из турбины для регенерации и приготовления горячего теплоносителя. Для установления соотношения между φ , ϕ и t_{ex} исследованы термодинамические циклы комбинированного производства электроэнергии и тепла с учетом всех энергетических потоков и потерь в турбинах.

Анализ результатов вычислительного эксперимента с помощью цикла показал, что зависимости $\varphi = f(t_{\text{ex}})$ и $\phi = f(t_{\text{ex}})$ можно выразить следующими эмпирическими уравнениями, которые позволяют вести многофакторные расчеты с помощью математической модели системы:

$$\varphi = 0,466 + 0,000434 t_{\text{ex}}, \quad (4)$$

$$\phi = 0,727 - 0,001628 t_{\text{ex}}. \quad (5)$$

Как видно из этих формул, значения φ и ϕ зависят от температуры пара t_{ex} , отбираемого из турбины.

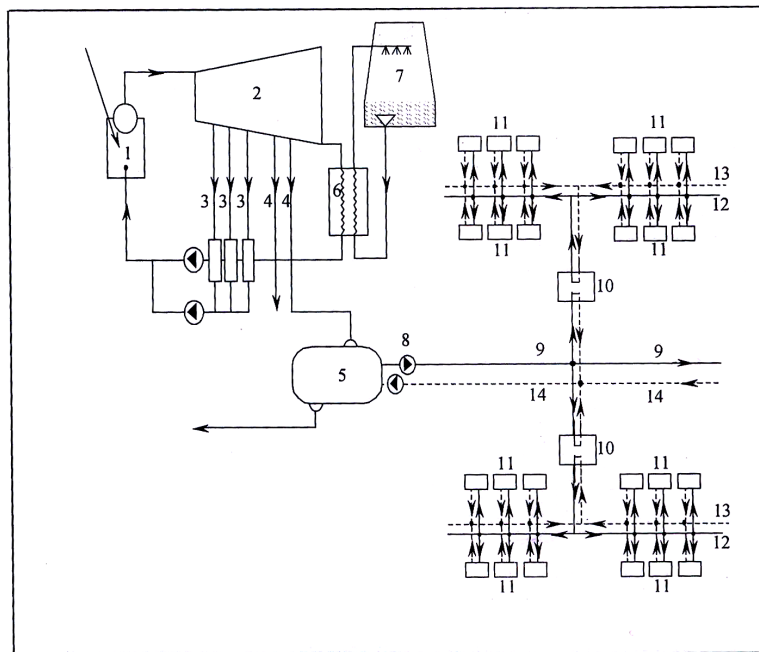


Рис.1. Концептуальная схема установки

Целью вывода уравнений (4) и (5) является создание возможности оценки общей энергетической эффективности теплофикационной системы при

различных значениях температуры t_{ex} , а также для ее оптимизации. Для этого в модели t_{ex} принимается переменной в зависимости от мощностных и конструктивных характеристик всей системы теплоснабжения. Значение t_{ex} определяется по следующей сумме:

$$t_{ex} = t_{tr.1} + \Delta t_{net.h.ex.}, \quad (6)$$

где $t_{tr.1}$ – температура теплоносителя на выходе сетевого теплообменника; $(\Delta t_{net.h.ex.}$ – температурный напор на выходе сетевого теплообменника между транзитным теплоносителем и паром из отбора турбины, также является переменной и оптимизируемой величиной.

В свою очередь, значение $t_{tr.1}$ обусловлено температурами на входе $t_{r.in}$ и выходе $t_{r.out}$ горячей воды отопительных приборов систем отопления зданий, температурным напором $\Delta t_{h.ex}$ в теплообменниках ЦТП, а также потерями тепла из трубопроводной системы транспортировки и распределения горячей воды. Из-за тепловых потерь в различных точках сети трубопроводов устанавливаются разные температуры теплоносителя. В общем случае температура подаваемой воды $t_{tr.1}$ на выходе из сетевого теплообменника определяется по выражению

$$t_{tr.1} = t_{r.in} + \Sigma \Delta t_{h.l.sup.},$$

где $\Sigma \Delta t_{h.l.sup.}$ – общие перепады температур в теплообменниках ЦТП и из-за потерь во всех участках подающих трубопроводов сети.

Для расчета температур воды в узловых точках участков теплосети воспользуемся следующей формулой [1]:

$$t_{(i)} = t_{gr} + (t_{r.in} - t_{gr}) e^{\frac{\pi l_{(i)}}{G_{w,i} c_w A}}, \quad (7)$$

где t_{gr} – среднегодовая температура грунта, °C; $l_{(i)}$ – длина участка трубопровода, м; $G_{w,i}$ – потоки воды в отдельных участках сети трубопроводов, кг/с; c_w – удельная теплоемкость воды, Дж/кг°C; A – тепловое сопротивление грунтового массива, определяемое по выражению [2]

$$A = \frac{1}{\alpha_w d_{in}} + \frac{1}{2\lambda_{ins}} \ln \frac{d_{in} + 2\delta_{ins}}{d_{in}} + \frac{1}{2\lambda_{gr}} \ln \frac{d_{in} + 2\delta_{ins} + 2\sqrt{a_{gr}\tau 3600}}{d_{in}}. \quad (8)$$

Здесь α_w – коэффициент теплоотдачи от теплоносителя к внутренней поверхности трубопровода, Вт/м²°C; d_{in} – диаметр трубопровода, м; δ_{ins} – толщина теплоизоляционного слоя, м; λ_{ins} – теплопроводность теплоизоляции, Вт/м°C; a_{gr} – температуропроводность грунта, м²/с; τ – число часов отопительного сезона, ч; λ_{gr} – теплопроводность грунтового массива, Вт/м°C.

Разработанный алгоритм и программа позволяют рассчитать тепловые потери и температуры на каждом участке подающих и обратных участков сети теплотрасс, начиная с отопительных приборов до сетевого теплообменника.

Определение энергетических параметров системы. Требуемая теплопроизводительность $Q_{cer.EX}$, кВт, сетевого теплообменника рассчитывается по следующей формуле:

$$Q_{cer.EX} = G_w C_w (t_{tr.1} - t_{tr.2}), \quad кВт, \quad (9)$$

где G_w – расход сетевой воды, циркулирующей по транзитной сети, кг/с:

$$G_w = \Sigma Q_{h.d} / C_w \Delta t_{f.c.} \text{ и } \Sigma Q_{h.d} = Q_{h.d.b} n_b. \text{ или } G_w = G_{w.b} n_b$$

$G_{w.b}$ – расход воды через радиаторы каждого здания, $кг/с$, который определяется по теплопотреблению каждого здания $Q_{h.d.b}$ по следующему отношению:

$$G_{w.b} = Q_{h.d.b} / C_w \Delta t_{f.c} \quad (n_b - \text{число зданий, присоединенных к распределительной сети}).$$

Величина $Q_{\text{сет.ЕХ}}$ включает общую потребность тепла всех зданий $\Sigma Q_{h.d}$, $кВт$, и все потери тепла в распределительной сети и является основой для расчета требуемой установленной электрической мощности ТЭЦ $N_{\text{ТРР}}$, $кВт$, которая определяется по формуле (1) в виде

$$N_{\text{ТРР}} = \phi Q_s, \quad Q_s = Q_{\text{сет.ЕХ}},$$

следовательно,

$$N_{\text{ТРР}} = \phi Q_{\text{сет.ЕХ}}. \quad (10)$$

Требуемое количество первичного тепла Q_{in} , $кВт$, производимого в котле ТЭЦ, составляет

$$Q_{\text{in}} = Q_s / \phi, \text{ или } Q_{\text{in}} = Q_{\text{сет.ЕХ}} / \phi, \quad кВт. \quad (11)$$

Количество произведенного электричества $E_{h.p.}$, $кВт \cdot ч$, за отопительный период ($Z_{h.seas}$, час) определяется по формуле

$$E_{h.p.} = Q_{\text{сет.ЕХ}} m Z_{h.seas} \phi, \quad (12)$$

где m – среднесезонный коэффициент отопительной нагрузки, $m=0,5$.

В остальное время года установленная тепловая Q_{in} мощность ТЭЦ остается неизменной, но электрическая мощность $N_{\text{ТРР.г.р}}$ увеличивается, так как отбор пара из турбины выключается и весь пар расширяется до давления в конденсаторе ТЭЦ. Это означает, что температура пара t_{ex} становится равной температуре конденсации – $t_{ex} = 35 \dots 40^\circ\text{C}$. Из формулы (5) следует, что при $t_{ex} = 35 \dots 40^\circ\text{C}$ значение $\phi_{r.p.}$ возрастает до 0,662. Следовательно, электрическая мощность $N_{\text{ТРР.г.р}}$ за этот период также возрастает:

$$N_{\text{ТРР.г.р}} = Q_{\text{сет.ЕХ}} \phi_{r.p.} \text{ или } N_{\text{ТРР.г.р}} = Q_{\text{in}} \phi_{r.p.} \phi. \quad (13)$$

Тогда производство электроэнергии $E_{r.p.}$, $кВт \cdot ч$, за остальную часть года составит:

$$E_{r.p.} = N_{\text{ТРР.г.р}} (8760 - Z_{h.seas}) \text{ или } E_{r.p.} = Q_{\text{сет.ЕХ}} \phi_{r.p.} (8760 - Z_{h.seas}). \quad (14)$$

Суммарное производство электроэнергии за год составит

$$E_{\text{год}} = E_{h.p.} + E_{r.p.} = Q_{\text{сет.ЕХ}} (m Z_{h.seas} \phi + \phi_{r.p.} (8760 - Z_{h.seas})). \quad (15)$$

Годовое потребление природного газа на ТЭЦ B_{gas} , $м^3/\text{год}$, определяется по следующей сумме:

$$B_{\text{gas}} = B_{\text{gas.h.p.}} + B_{\text{gas.r.p.}}, \quad (16)$$

где $B_{\text{gas.h.p.}}$ – потребление газа за отопительный сезон, $м^3/\text{сез}$; $B_{\text{gas.r.p.}}$ – потребление газа за оставшийся период года, когда ТЭЦ производит только электроэнергию.

Величина $B_{\text{gas.h.p.}}$ меняется в зависимости от тепловой нагрузки $Q_{\text{net.НЕ}}$, $кВт$, на отопление зданий за сезон. Поэтому она определяется по следующей формуле:

$$B_{\text{gas.h.p.}} = Q_{\text{in.h.p.}} / Q_{\text{gas}} \eta_b \text{ или } B_{\text{gas.h.p.}} = Q_{\text{сет.ЕХ}} m Z_{\text{seas}} / \phi Q_{\text{gas}} \eta_b, \quad (17)$$

где Q_{gas} – удельная теплота сгорания природного газа, $кДж/м^3$.

Поскольку мощность котла $Q_{\text{in.h.p.}}$ в остальное время года не меняется и равна зимней мощности, то потребление газа на ТЭЦ только на генерацию электроэнергии $B_{\text{gas.r.p}}$ составит

$$B_{\text{gas.r.p.}} = Q_{\text{in}} / Q_{\text{gas}} \eta_b \text{ или } B_{\text{gas.r.p.}} = Q_{\text{сет.ЕХ}} (8760 - Z_{h.seas}) / \phi Q_{\text{gas}} \eta_b. \quad (18)$$

С учетом (16) - (18) получаем следующее выражение для расчета годового потребления природного газа V_{gas} , $\text{м}^3/\text{год}$, на ТЭЦ :

$$V_{\text{gaz}} = \frac{Q_{\text{сст. EX}}}{\varphi Q_{\text{gas}} \eta_b} (Z_{\text{h. seas.}} (m - 1) + 8760). \quad (19)$$

Годовое потребление газа V_{gas} и, следовательно, затраты на газ относятся только к производству электроэнергии, поскольку даже без утилизации отходного тепла от ТЭЦ для теплоснабжения производство электричества все равно требует такого же потребления газа.

Определение конструктивных параметров системы. Конструктивными параметрами являются диаметры участков сети транзитных и распределительных трубопроводов, сечения траншей трубопроводов, толщины теплоизоляционных слоев на трубопроводах и конструкциях зданий, площадь теплообмена теплообменников ЦТП и сетевого теплообменника, внутренние отопительные системы зданий, насосы и т.д.

Диаметры разных участков трубопровода $d_{p.i}$, м , определяются с учетом потоков воды в каждом из них по формуле

$$d_{p.i} = 4G_{w.i} / \omega \pi r_w.$$

Согласно градостроительным нормам, сооружение ТЭЦ должно быть расположено на расстоянии 3000...4000 м от жилых массивов, следовательно, длина транзитных линий принимается такой же.

Суммарная поверхность нагрева $F_{\text{loc. HE}}$, м^2 , всех теплообменников ЦТП определяется по формуле

$$F_{\text{loc. HE}} = \frac{Q_{\text{loc. HE}} (N_{\text{tr. dist}} + 1)}{k_{\text{loc. HE}} \Delta t_{\text{aver. loc. HE}}}, \quad (20)$$

где $k_{\text{loc. HE}}$ – коэффициент теплопередачи теплообменника, $\text{Вт}/\text{м}^2\text{°C}$; $N_{\text{tr. dist.}}$ – число участков трубопровода транзитного теплоносителя в пределах обслуживаемого района; $\Delta t_{\text{aver. loc. HE}}$ – среднелогарифмическая разность температур в теплообменниках ЦТП, равная

$$\Delta t_{\text{aver. loc. HE}} = \frac{(t_{\text{tr. (i)}} - t_{\text{Sup. m}}) - (t_{\text{tr. (i)}} - t_{\text{Ret. m}})}{\ln \frac{(t_{\text{tr. (i)}} - t_{\text{Sup. m}})}{(t_{\text{tr. (i)}} - t_{\text{Ret. m}})}}. \quad (21)$$

Поверхность нагрева сетевых теплообменников $F_{\text{net. HE}}$, м^2 , определяется по следующему уравнению:

$$F_{\text{net. HE}} = \frac{Q_{\text{H. EX}}}{k_{\text{net. HE}} \Delta t_{\text{aver. net. HE}}}, \quad (22)$$

где $k_{\text{net. HE}}$ – коэффициент теплопередачи сетевых теплообменников, $\text{Вт}/\text{м}^2\text{°C}$; $\Delta t_{\text{aver. net. HE}}$ – среднелогарифмическая разность температур в сетевых теплообменниках, °C , равная

$$\Delta t_{aver.net.HE} = \frac{(t_{ex} - t_{tr.(1)}) - (t_{ex} - t_{tr.(2)})}{\ln \frac{(t_{ex} - t_{tr.(1)})}{(t_{ex} - t_{tr.(2)})}}. \quad (23)$$

Определение экономических показателей системы. Главными экономическими показателями системы являются себестоимости тепла и электроэнергии. Они должны быть определены отдельно с помощью годовых расчетных затрат T , \$/год, на каждую из них в отдельности. С точки зрения правильной оптимизации, стоимость тепла правильнее отнести к 1 м^2 жилой площади зданий за отопительный сезон C_s , \$/м²сез, а стоимость электричества – к $1 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$, C_{el} , \$/кВт·ч. Поэтому необходимо оценить годовые расчетные затраты T_r , \$/год, в отдельности для частей системы, служащих для производства и снабжения тепловой и электрической энергий. С этой целью полные капитальные вложения в теплофикационную систему должны быть распределены между тепло- и электроснабжающими частями системы.

Стоимость электроэнергии C_{el} , \$/кВт·ч, определяется как отношение годовых фактических расчетных затрат $T_{r.el}$, \$/год, на количество электроэнергии E_{year} , кВт·ч, произведенной за год на тепловом потреблении, то есть

$$C_{el} = T_{r.el} / E_{year}. \quad (24)$$

Поскольку стоимость ТЭЦ K_{TPP} , \$, приписывается к электрической мощности, то она должна быть использована только при определении стоимости электроэнергии. Фактические годовые расчетные затраты $T_{r.el}$ могут быть определены по следующему уравнению:

$$T_{r.el} = \frac{K_{TPP}}{Y} \left[1 + \frac{(Y+1)D_R}{2} \right] + \frac{\Sigma U_{el} [(1+R_{inf})^Y - 1]}{Y R_{inf}}, \quad (25)$$

где D_R – банковская учетная ставка; Y – срок окупаемости, год; U_{el} – годовые эксплуатационные расходы на производство электроэнергии, \$/год; R_{inf} – степень годовой инфляции.

Стоимость ТЭЦ K_{TPP} , \$, определяется по установленной электрической мощности N_{TPP} , кВт, по формуле

$$K_{TPP} = C_{TPP} N_{TPP}, \quad (26)$$

где C_{TPP} – средняя стоимость 1 кВт установленной мощности ТЭЦ, \$/кВт.

Годовые эксплуатационные расходы на производство электроэнергии ΣU_{el} , \$/год, на ТЭЦ составляют

$$\Sigma U_{el} = U_{r.TPP} + U_{am.TPP} + U_{s.TPP} + U_{gas.el}, \quad (27)$$

где $U_{r.TPP}$ – годовые расходы на текущие ремонтные работы на ТЭЦ, \$/год; $U_{am.TPP}$ – годовая амортизация ТЭЦ, \$/год; $U_{s.TPP}$ – годовая зарплата для обслуживания системы ТЭЦ, \$/год; $U_{gas.el}$ – годовая стоимость газа, потребляемого для производства электроэнергии, \$/год.

Для определения годовых эксплуатационных расходов на производство электроэнергии предлагаются следующие формулы:

$$U_{r.TPP} = 0,05 K_{TPP}; U_{am.TPP} = 0,05 \Sigma K_{TPP}; U_{s.el} = 479,42 N_{TPP}^{0,416};$$

$$U_{gas.el} = C_{gas} B_{gas.in.year}, \quad (28)$$

где C_{gas} – стоимость 1 м^3 газа, \$/м³.

Стоимость тепла C_h , $\$/m^2\text{сез}$, определяется отношением годовых фактических расчетных затрат на теплоснабжение $T_{r,h}$, $\$/год$ к $1m^2$ суммарной жилой площади ΣS , m^2 отапливаемых зданий, то есть

$$C_{el} = T_{r,h} / \Sigma S. \quad (29)$$

Фактические годовые расчетные затраты $T_{r,e}$, $\$/год$, определяются по следующему уравнению:

$$T_{r,h} = \frac{\Sigma K_{h.s.s}}{Y} \left[1 + \frac{(Y+1)D_R}{2} \right] + \frac{\Sigma U_{h.s.s} [(1+R_{inf})^Y - 1]}{Y R_{inf}}, \quad (30)$$

где U_{el} – годовые эксплуатационные расходы на теплоснабжение, $\$/год$.

Капитальные вложения, приписываемые теплоснабжению $\Sigma K_{h.s.s}$, $\$$, суммируются из вложений во все части транспортировки, распределения и потребления тепла на нужды отопления зданий:

$$\Sigma K_{h.s.s} = K_{tr.p} + K_{tr.dist} + K_{m.p} + K_{dis} + K_{trench} + K_{net.h.e} + K_{l.h.e} + K_{pump} + K_{ins.b} + K_{weath} + K_{int.h.s}, \quad (31)$$

где $K_{tr.p}$, $K_{tr.distr}$, $K_{m.p}$, $K_{d.p}$, $K_{net.h.e}$, $K_{l.h.e}$, K_{pump} , $K_{int.h.s}$ – начальные стоимости транзитных тепловых сетей, магистральных и распределительных теплосетей, траншей трубопроводов, теплообменников ЦТП, сетевого теплообменника, циркуляционных насосов и внутренних отопительных систем зданий, $\$$; $K_{ins.b}$, K_{weath} – начальные вложения для улучшения теплофизических свойств отапливаемых зданий (стоимость дополнительной теплоизоляции и уплотнения окон).

Для определения всех указанных компонентов капитальных вложений в систему теплоснабжения составлены эмпирические выражения, удобные для ведения оптимизационных расчетов с учетом их переменности.

Годовые эксплуатационные затраты, $\Sigma U_{h.s.s}$, $\$/год$, на теплоснабжение от ТЭЦ определяются суммой следующих затрат:

$$\Sigma U_{h.s.s} = U_{r,h.s} + U_{am,h.s} + U_{s,h.s} + U_{el,pump}, \quad (32)$$

где $U_{r,h.s}$, $U_{am,h.s}$, $U_{s,h.s}$, $U_{el,pump}$ – соответственно годовые расходы на текущий ремонт, амортизацию, зарплату и на электроэнергию, потребляемую насосами теплосети, $\$/год$.

Для определения значений годовых затрат предлагаем следующие формулы:

$$U_{r,h.s} = 0,05 \Sigma K_{h.s.s}; \quad U_{am,h.s} = 0,05 \Sigma K_{h.s.s}; \quad U_{s,h.s} = 500(N_{tr.dist} + 1) + 250(N_{m.p} - 1);$$

$$U_{el,pump} = C_{el.m} N_{pump.seas} \cdot (C_{el.m} - \text{цена на электричество, } \$/kVt \cdot \text{ч}, N_{pump.seas} - \text{сезонное потребление электроэнергии циркуляционными насосами теплосети, } kVt \cdot \text{ч/сез}).$$

Совокупность всех представленных выше уравнений представляет собой математическую модель системы в целом, включающей здания, тепловые сети и ТЭЦ. Модель позволяет определить оптимальные конструктивные и энергетические параметры всех частей системы. Оптимизационный анализ осуществляется по разработанному алгоритму и программному обеспечению, по которым проведены расчеты с целью выявления минимальных себестоимостей тепла C_h , $\$/m^2$, и электроэнергии C_{el} , $\$/1000 kVt \cdot \text{ч}$, и соответствующие им оптимальные конструктивные, мощностные, энергетические и другие параметры системы для примера энергоснабжения 9-этажных бетонных зданий района в климатических условиях г. Еревана. Результаты расчетов представлены графически на рис. 2.

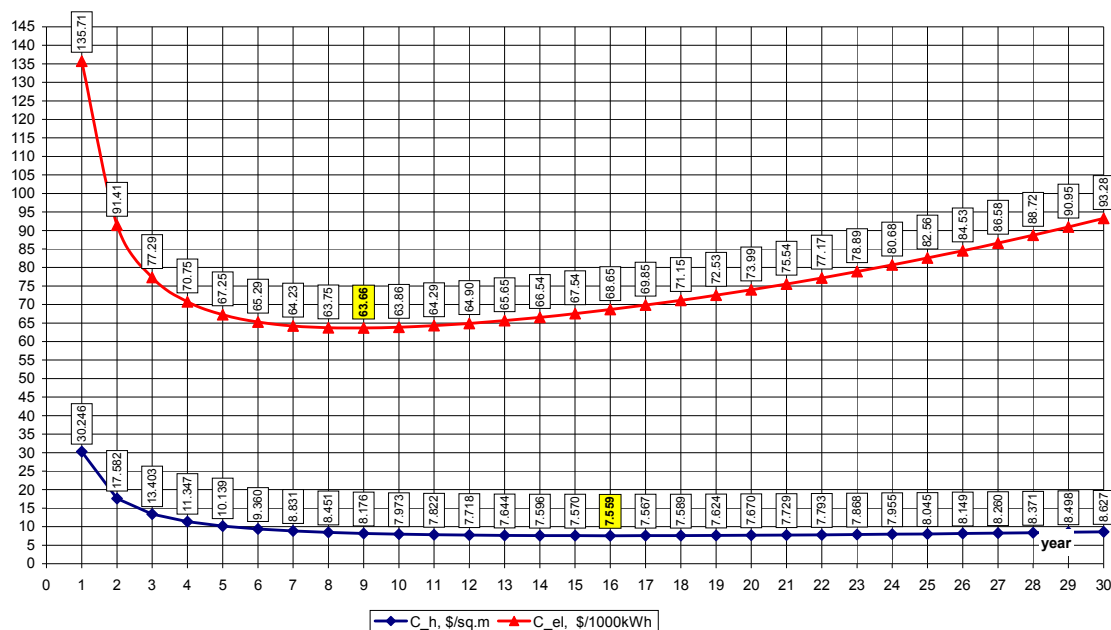


Рис. 2. Минимальные тарифы тепла C_h , $\$/m^2$, отнесенные к $1m^2$ жилой площади и электроэнергии C_{el} , $\$$, за 1000 кВт·ч для теплофикационной системы

Из графика следует, что при учете дисконта и годовой инфляции минимальный тариф тепла $C_h = \$7,23/m^2$, при оптимальном сроке окупаемости $Y = 16$ лет, а электроэнергии — $C_{el} = \$63,66$ за 1000 кВт·ч, при оптимальном сроке окупаемости капитальных вложений $Y = 9$ лет.

В таблице приведены оптимальные значения всех конструктивных и энергетических параметров системы в целом. Из данных таблицы следует, что при указанных входных параметрах система требует определенного числа зданий и формирует оптимальную конфигурацию сети теплоснабжения. Даются также оптимальные значения электрической и тепловой мощностей системы и указывается оптимальная температура пара на отборе турбины.

Таблица

Оптимальные параметры системы	Число зданий, подключенных к каждому участку распределительных трубопроводов		
	1 здание	2 здания	4 здания
C_h , $\$/m^2$ сезон	7,711	7,559	7,470
C_{el} , $\$/кВт·ч$	0,069	0,069	0,069
Опт. толщина изоляции зданий, м	0,03	0,03	0,03
Суммарная отопительная нагрузка всех зданий, подключенных к системе, кВт	65124	161688	182348
Число всех зданий, подключенных к системе	580	1440	1624

Продолжение табл.

Суммарный объем всех зданий, подключенных к системе, m^3	5073840	1259710 0	1420680 0
Суммарная длина всех участков транзитного трубопроводов в районе, m	1400	1450	1400
Суммарная длина всех участков главных распределительных трубопроводов в районе, m	29000	36000	20300
Температура пара на отборе турбины, $^{\circ}C$	130,6	129,4	128,6
Электрическая мощность ТЭЦ, kBt	53428,1	124907	134010
Тепловая мощность сетевого теплообменника ТЭЦ, kBt	80707,1	188682	202432
Поверхность теплообмена каждого из теплообменников ЦТП, m^2	489,8	1123,4	1247,3
Число всех теплообменников ЦТП, подключенных к системе	58	60	58
Поверхность теплообмена всех теплообменников ЦТП, m^2	28414	67403,7	72347,1
Поверхность сетевого теплообменника ТЭЦ, m^2	7940,19	18945,7	20658,6
Опт. толщина изоляции трубопровода, m	0,1	0,1	0,1
Капитальные вложения в ТЭЦ, \$	2938540 0	6869900 0	7370540 0
Капитальные вложения в систему теплоснабжения, \$	2598880 0	6334180 0	7059650 0
Стоимость выбросов тепличных газов, \$/год	6871290	1607880 0	1726280 0

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Меликян З. А.** Централизованное теплоснабжение гражданских и промышленных сооружений. – М.: Стройиздат, 1985. – 145 с.
- Melikyan Z.** Ice Storage Geothermal Heat Pump//Proceedings of 20-th World Energy Congress. - Atlanta, USA. - 1997. - P. 279 – 286.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 11.06.2005.

Զ. Ա. ՄԵԼԻԿՅԱՆ, Վ. Ռ. ԽԱՐԱԶՅԱՆ

**ԶԵՐՄՈՒԹՅԱՆ ԵՎ ԷԼԵԿՏՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՀԱՄԱԿՑՎԱԾ ԱՐՏԱԴՐՈՒԹՅԱՆ ԿԱՅԱՆՆԵՐԻՑ
ՇԵՆՔԵՐԻ ԶԵՐՄԱԷՆԵՐԳԱՄԱՏԱԿԱՐԱՐՄԱՆ ԿԵՆՏՐՈՆԱՑՎԱԾ ՀԱՄԱԿԱՐԳԻ
ՕՊՏԻՄԱԼԱՑՄԱՆ ՄԱԹԵՄԱՏԻԿԱԿԱՆ ՄՈԴԵԼ**

Մշակված է ջերմաէլեկտրակենտրոնից ջերմաէներգամատակարարման համակցված համակարգի համալիր օպտիմալացման մաթեմատիկական մոդել, որը հաշվի է առնում վերջնական սպառողի համար ջեռուցման ջերմային էներգիայի և էլեկտրաէներգիայի արժեքի ձևավորման վրա բոլոր հիմնական գործոնների ազդեցությունը:

Առանցքային բաներ. ջերմության և էլեկտրաէներգիայի համակցված արտադրություն, մաթեմատիկական մոդել, ջերմային էներգիայի արժեք, համակցված համակարգի օպտիմալ պարամետրեր:

Z. A. MELIKYAN, V. R. KHARAZYAN

**OPTIMIZATION OF SIMULATION MODEL FOR A SYSTEM OF CENTRALIZED HEAT AND
ELECTRICITY SUPPLY FROM COGENERATION POWER PLANT**

A simulation model for complex optimization of centralized heat and electricity supply system from cogeneration power plant is developed. All main factors that form the costs of supplied heat for both building heating and electricity are taken into account. Optimal design parameters of the whole system are revealed.

Keywords: cogeneration, simulation model, cost of thermal energy, optimal parameters of cogeneration plant.

Ս.Վ. ՇԱՀՎԵՐԴՅԱՆ, Ա.Ռ. ՄԻՍՈՆՅԱՆ

**¹⁶N ՌԱԴԻՈՆՈՒԿԼԻԴԻ ՏՐՈՂՄԱՆ ԱՌԱՆՁՆԱՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՕԳՏԱԳՈՐԾՈՒՄԸ
ՀԱԷԿ-Ի ԱՌԱՋԻՆ ԿՈՆՏՈՒՐԻՑ ԱՐՏԱՀԱՆՈՒՄԻ ԳՐԱՆՑՄԱՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳՈՒՄ**

Ներկայացվում է ԱԱԷԿ-ի առաջին կոնտուրի ջերմակրի արտահոսքի հայտնաբերման և գրանցման մեթոդ: Այն հիմնված է ռեպերային իզոտոպի ¹⁶N օգնությամբ ԱԱԷԿ-ի առաջին կոնտուրի ջերմակրի ակտիվության գրանցման վրա: Ներկայացվում է նաև ¹⁶N-ի՝ որպես ռեպերային իզոտոպի ընտրության հիմնավորումը:

Առանցքային բառեր. առաջին կոնտուր, ջերմակիր, արտահոսք, ռեպերային իզոտոպ:

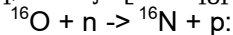
ՀԱԷԿ-ի նորմալ աշխատանքի ժամանակ շոգեգեներատորների և գլխավոր շրջանառության պոմպերի բոքսում առկա է որոշակի գամմա ֆոն, որը պայմանավորված է բոքսում տեղաբախշված և առաջին կոնտուրի ռադիոակտիվ ջերմակրով աշխատող խողովակաշարերից և սարքավորումներից ճառագայթումով: Ճառագայթման աղբյուր հանդիսացող իզոտոպների մի մասն առաջանում է հենց ռեակտորում, իսկ մյուս մասը ջրաքիմիական ռեժիմը կարգավորելու համար առաջին կոնտուր մուտք արված և հետագայում ակտիվացած քիմիական ռեագենտներն են: Առաջին կոնտուրում առկա իզոտոպների գամմա ճառագայթման սպեկտրը բավականին լայն է՝ 0,25...6,13 Mev: Գամմա ֆոնը բոքսում կարող է փոփոխվել կախված տվյալ գամմա ճառագայթման աղբյուր հանդիսացող իզոտոպի առաջին կոնտուրում ունեցած ծավալային ակտիվության փոփոխման չափից: Ըստ իզոտոպի առաջացման աղբյուրի՝ իզոտոպի ծավալային ակտիվությունը առաջին կոնտուրում կարող է փոխվել՝ կախված ջրա-քիմիական ռեժիմից, տեխնոլոգիական գործընթացներից և ռեակտորի հզորությունից: Սակայն եթե վերը նշված գործոնները չեն փոխվում, ֆոնը կարող ենք համարել հաստատուն:

Դիտարկենք արտահոսքն առաջին կոնտուրի գլխավոր շրջանառության խողովակից: Եթե արտահոսքի տեղամասում տեղադրվի գամմա դետեկտոր, ապա արտահոսքը սկսվելուց հետո այն կգրանցի ֆոնի մեծացում, որն այս դեպքում նշանակում է արտահոսքի առկայություն: Այսպիսով, այս եղանակով կարող ենք գրանցել արտահոսքի առկայությունը: Հետևաբար կարելի է մշակել արտահոսքի գրանցման համակարգ, որը կգրանցի արտահոսքի առաջացման վայրը և ,ինչպես ցույց կտանք ստորև, նաև արտահոսքի չափը: Սակայն ֆոնը կարող է մեծանալ նաև առաջին կոնտուրում գամմա իզոտոպի ծավալային ակտիվության մեծացման պատճառով, որը դետեկտորի կողմից նույնպես կգրանցվի որպես արտահոսք: Գրանցման անհրաժեշտ ճշգրտություն ապահովելու համար պետք է կատարել ռեպերային իզոտոպի ճիշտ ընտրություն: Ռեպերային իզոտոպին ներկայացվում են հետևյալ պահանջները.

- 1) նուկլիդի մեծ ծավալային ակտիվություն առաջին կոնտուրում,
- 2) ռեպերային իզոտոպի ծավալային ակտիվությունը պետք է կախված չլինի տեխնոլոգիական պրոցեսների փոփոխություններից և ջրա-քիմիական ռեժիմից,

3) այդ իզոտոպը պետք է ունենա ճառագայթման հարմար էներգետիկ տիրույթ: Այսինքն՝ իզոտոպի գամմա քվանտի էներգիան չընդգրկվի այլ իզոտոպի ճառագայթման էներգետիկ դիապազոնում: Վերջինս անհրաժեշտ է նրա համար, որպեսզի դետեկտորը հավաստի ձևով գրանցի միայն ռեպերային իզոտոպի ակտիվության փոփոխությունները և այլ իզոտոպների ծավալային ակտիվությունների փոփոխությունները չգրանցի որպես ռեպերային իզոտոպի ծավալային ակտիվության փոփոխություն:

Առաջին պայմանին բավարարում են ^{16}N , ^{24}Na , ^{42}K իզոտոպները, որոնց ծավալային ակտիվությունները ռեակտորի 100% հզորության վրա աշխատանքի ժամանակ կազմում են. $A_v(^{16}\text{N}) \approx 3.7 \cdot 10^9 \text{ Fy/l}$, $A_v(^{24}\text{Na}) \approx 1.4 \cdot 10^6 \text{ Fy/l}$, $A_v(^{42}\text{K}) \approx 1.6 \cdot 10^7 \text{ Fy/l}$: Հաշվի առնելով, որ ինչպես ^{24}Na -ի, այնպես էլ ^{42}K -ի ծավալային ակտիվությունները կախված են առաջին կոնտուրի ջրա-քիմիական ռեժիմից, ավելի նպատակահարմար է ընտրել ^{16}N իզոտոպը: Այն առաջանում է ռեակտորի ակտիվ գոտում արագ նեյտրոնների կողմից թթվածնի միջուկների ռմբակոծման ժամանակ, հետևյալ ռեակցիայով.



^{16}N ծավալային ակտիվությունը կախված չէ ոչ ջրա-քիմիական ռեժիմից և ոչ էլ ջերմակրի ակտիվության կոռոզիոն բաղադրիչից: ^{16}N ունի նաև ճառագայթման հարմար էներգետիկ տիրույթ, քանի որ ունի էներգետիկ սպեկտր 5...7 Mev-ի շրջակայքում և ինտենսիվ գազաթ (69%) գամմա քվանտի 6,13 Mev էներգիայի դեպքում: ^{16}N ռադիոնուկլիդի կիսատրոհման պարբերությունը բավականին փոքր է մոտ 7,12 վրկ:

Հետագոտելով արտահոսքի դեպքում ակտիվության աճի դինամիկան կարելի է տեսնել, որ մոտավորապես 55 վրկ-ից ^{16}N -ի ակտիվությունը դուրս է գալիս պլատո: Ենթադրենք ունենք F լ/ժամ ծախքով արտահոսք, ջերմակրի ծավալային A_v ակտիվությամբ, որը բերում է $A_v^* F$ արագությամբ առաջին կոնտուրից ակտիվության

«դուրս նետմանը»: Ըստ ակտիվության դասական սահմանման $A = N \times \lambda$ կամ $N = \frac{A}{\lambda}$:

Որտեղ N -ը տվյալ ռադիոնուկլիդի դեռ չտրոհված միջուկների թիվն է, λ -ն այդ իզոտոպի համար տրոհման հաստատունն է: Ակտիվությունը արտահոսքի պատճառով dt ժամանակում կաճի հետևյալ ձևով.

$$\delta N_1 = \frac{\delta A}{\lambda} = \frac{\Phi \times A_v}{\lambda} \times \delta t, \quad (1)$$

որտեղ dN_1 -ը արտահոսքի հետևանքով ռադիոնուկլիդի միջուկների թվի աճն է: Այդ ակտիվությունը նաև կնվազի նուկլիդների տրոհման հետևանքով $dN_2 = N \lambda dt$: Որտեղ dN_2 -ը ռադիոնուկլիդի միջուկների թվի նվազումն է տրոհման հետևանքով: Հաշվի առնելով աճի և նվազման երկու հավասարումները՝ կարող ենք գրել ըստ ժամանակի ակտիվության բալանսի հավասարումը:

$$dN = dN_1 - dN_2 = \frac{F \times A_v}{\lambda} \times dt - \lambda N \times dt \quad (2)$$

կամ

$$dt = \frac{dN}{\left(\frac{F \times A_v}{\lambda} - N \lambda \right)}; \quad (3)$$

$$\lambda dt = - \frac{d\left(\frac{FA_v}{\lambda} - N\lambda\right)}{\frac{FA_v}{\lambda} - N\lambda}; \quad (4)$$

Վերջին արտահայտությունը ինտեգրելով՝ կստանանք,

$$\int \lambda dt = - \int \frac{d\left(\frac{FA_v}{\lambda} - N\lambda\right)}{\frac{FA_v}{\lambda} - N\lambda}; \quad (5)$$

$$-\lambda t = \ln \left| \frac{FA_v}{\lambda} - N\lambda \right| + C; \quad (6)$$

C հաստատուն գործակիցը կարելի է գտնել՝ հավասարման մեջ տեղադրելով սկզբնական պայմանները. $t=0$; $N=0$: Արդյունքում կստանանք՝

$$C = -\ln \frac{FA_v}{\lambda}, \quad (7)$$

որը տեղադրելով հավասարման մեջ՝ կստանանք.

$$-\lambda t = \ln \left(1 - \frac{N\lambda^2}{FA_v} \right), \quad (8)$$

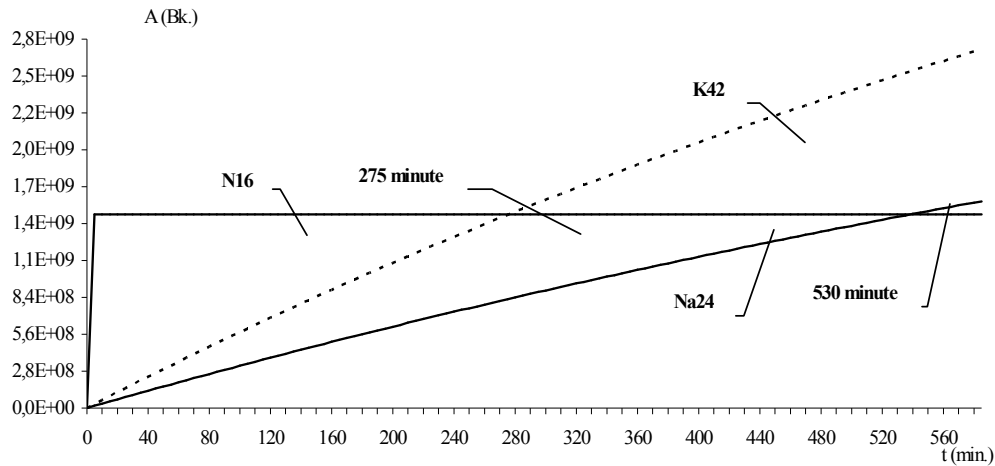
$$e^{-\lambda t} = 1 - \frac{N\lambda^2}{FA_v}; \quad (9)$$

Ստանում ենք չտրոհված միջուկների թվի կապը ժամանակի հետ (որոնք էլ տալիս են դետեկտորի հաշիվը):

$$N(t) = \frac{FA_v}{\lambda^2} \left(1 - e^{-\lambda t} \right); \quad (10)$$

Ստորև բերված գրաֆիկն արտահայտում է տարբեր ռադիոնուկլիդների համար ակտիվության աճի կախվածությունը ժամանակից՝ ըստ (10) բանաձևի: Ինչպես երևում է բերված գրաֆիկից, ^{24}Na -ի և ^{42}K -ի ակտիվությունների կախումը զծային է, այսինքն՝ որոշ ժամանակ անց (համապատասխանաբար 573 թ. և 375 թ.) այս ռադիոնուկլիդների ակտիվությունը կսկսի գերազանցել ^{16}N -ի ակտիվությունը: Իսկ արտահոսքը օպերատիվ գրանցելու համար ավելի նպատակահարմար է ընտրել ^{16}N -ը, որի ակտիվությունը արտահոսքի սկսման առաջին ժամերի ընթացքում, մոտ 3 կարգով գրազանցում է ^{24}Na -ի և ^{42}K -ի ակտիվությունները: Բացի այդ, ինչպես երևում է գրաֆիկից, ^{16}N -ի ակտիվությունը որոշ ժամանակ անց դուրս է գալիս “պլատո”։ Տարբեր ծախսերով արտահոսքերին կհամապատասխանեն ակտիվության պլատոյի տարբեր արժեքներ։ Այս առանձնահատկությունը կարելի է

օգտագործել որպես արտահոսքի հայտնաբերման լրացուցիչ պայման: Այսպիսով, արտահոսքի գրանցման համար, որպես ռեպերային իզոտոպ հարմար է ընտրել ^{16}N ռադիոնուկլիդը, որպես այնպիսի ակտիվության աղբյուր, որն ունի ճառագայթման մեծ ինտենսիվություն, գրանցման հարմար էներգետիկ տիրույթ և որի ծավալային ակտիվությունը առաջին կոնտուրի ջերմակրի մեջ կախված է միայն ռեակտորի հզորությունից:



Նկ.

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. Гусев Н.Г., Машкович В.П., Суворов А.П. Защита от ионизирующих излучений.- М.: Атомиздат, 1980. - Т. 1. - 400 с.
2. Гусев Н.Г., Машкович В.П., Суворов А.П. Защита от ионизирующих излучений. – М.: Атомиздат, 1980 - Т. 2. – 308 с.
3. Болятко В.В., Куликовский М.Я. и др. Радиационная защита на атомных электростанциях. – М.: Атомиздат, 1978. – 410 с..

ՀԱՅԱՏՈՄ: Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 22.12.2004:

С.В. ШАГВЕРДЯН, А.Р. СИМОНЯН

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ РАСПАДА РАДИОНУКЛИДА ^{16}N В СИСТЕМЕ
РЕГИСТРАЦИИ ТЕЧИ ИЗ ПЕРВОГО КОНТУРА**

Предлагается метод обнаружения и регистрации течи из первого контура ААЭС. Метод основан на регистрации активности теплоносителя первого контура ААЭС с помощью реперного изотопа ^{16}N . Приводится также обоснование выбора ^{16}N как реперного изотопа.

Ключевые слова: первый контур, теплоноситель, течь, реперный изотоп.

S.V. SHAHVERDYAN, A.R. SIMONYAN

**USE OF DISINTEGRATION RADIONUCLIDE ^{16}N FEATURES IN SYSTEMS OF FURFACE
REGISTRATIONS FROM THE FIRST CONTOUR**

The method of detection and registration of a leak from the first contour ANPP is proposed. The method is based on registration of the first contour ANPP heat-carrier with the help of reper isotope ^{16}N . The substantiation of ^{16}N as a reper isotope is also given.

Keywords: first contour, heat-carrier, leak, reper isotope.

А.З. АДАМЯН

ПРОГРАММНО-УПРАВЛЯЕМАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ГАЗОВЫХ СЕНСОРОВ

Описывается программно-управляемая автоматизированная установка для измерения и контроля параметров полупроводниковых резистивных газовых сенсоров. Разработанное программное обеспечение измерительной системы позволяет регистрировать изменения сопротивления сенсоров в широком диапазоне (от 10 до 10^{12} Ом), происходящие как в результате быстротекущих ($\sim 0,1$ с), так и возможных длительных процессов, связанных с нестабильностью или деградацией параметров сенсоров при их длительной эксплуатации. С помощью предлагаемой установки можно получить достоверную информацию как обо всех параметрах исследуемых газовых сенсоров (чувствительность, времена отклика и восстановления, рабочая температура сенсора и др.), так и об изменениях параметров газовой среды в камере (давление газовой смеси и концентрация воздействующего на сенсор газа). Представлены измеренные с помощью данной установки характеристики металлооксидных сенсоров водорода.

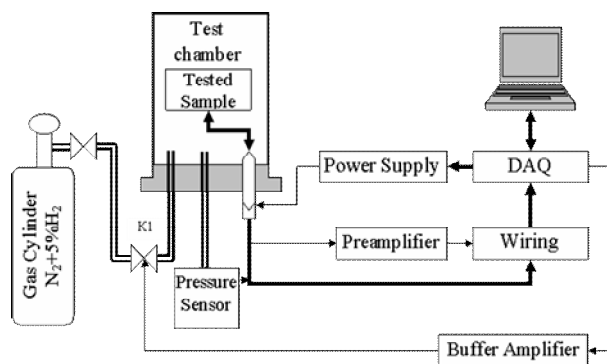
Ключевые слова: газовый сенсор, плата сбора данных, автоматизированная измерительная установка.

Введение. С ужесточением экологических требований, связанных с катастрофическим ростом выбросов вредных и токсичных газов в атмосферу от транспорта, а также с необходимостью контроля производственных процессов и утечек горючих и взрывоопасных газов резко возросла потребность в газовых сенсорах.

Полупроводниковые газовые сенсоры позволяют осуществлять непрерывный автоматизированный мониторинг окружающей среды, а также контролировать условия различных процессов, например, состав газовых смесей, образующихся в ячейках топливных элементов [0]. Это намного повышает безопасность эксплуатации, а также делает возможным создание более экологичных и эффективных машин и устройств. Разнообразие сфер применения газовых сенсоров [0, 0] приводит к необходимости разработки сенсоров, способных длительное время работать при тех или иных условиях – применительно к данной задаче.

Целью данной работы является разработка автоматизированной измерительной установки для проведения измерений электрофизических характеристик полупроводниковых резистивных газовых сенсоров. Данные сенсоры представляют собой заключенную в металлостеклянный корпус керамическую подложку с нанесенным на нее газочувствительным слоем, нагреваемую до необходимой рабочей температуры. Наличие такой установки значительно облегчает поиск оптимального режима работы сенсора и обеспечивает получение наиболее достоверных данных об условиях проведения эксперимента [0]. При разработке управляющей программы установки

учитываются многие специфические особенности измерений с газовыми сенсорами, а также в режиме реального времени проводится математическая обработка получаемых данных, что в целом облегчает установление корреляции между происходящими во время эксперимента явлениями.



Программа управления дает возможность изменения состава, температуры и давления газовой среды, а также регулирования температуры поверхности исследуемых образцов. Канал измерения сопротивления исследуемых сенсоров подключается к DAQ через буферный предусилитель У5-9, что обеспечивает измерение сопротивления и его изменений во времени в широком диапазоне (от 10 до 10^{12} Ом) с достаточной точностью.

Посредством двух прецизионных датчиков температуры LM335 регистрируются комнатная температура и температура окружающей среды вблизи сенсора. Датчики соединены к DAQ- плате по стандартной схеме и на рис. 1 и 2 не отображены. Данные об этих температурах также могут быть использованы, например, для определения ТКС тонкопленочного нагревателя или относительной влажности среды психрометрическим методом или методом установления точки росы.

Таким образом, разработанное нами программное обеспечение измерительной системы позволяет регистрировать изменения сопротивления сенсоров, происходящие в результате как быстротекущих (доли секунды), так и длинновременных процессов, связанных с возможной нестабильностью или деградацией параметров сенсоров при их длительной эксплуатации.

Следует также отметить, что сопротивление тонкопленочных сенсоров во время эксперимента может изменяться в широких пределах (до 5 порядков и более). Следовательно, динамического диапазона 12-битного аналого-цифрового преобразователя (АЦП) уже недостаточно для точного измерения величины поступающего от сенсора сигнала. С учетом этого введена возможность автоматического изменения программируемого коэффициента усиления DAQ-платы, что обеспечивает непрерывное поступление точных данных.

Рабочая температура задается подачей питания на резистивный нагреватель сенсора через подключенный к DAQ источник питания Б5-49. Температура контролируется измерением сопротивления нагревателя с последующим пересчетом с учетом его температурного коэффициента.

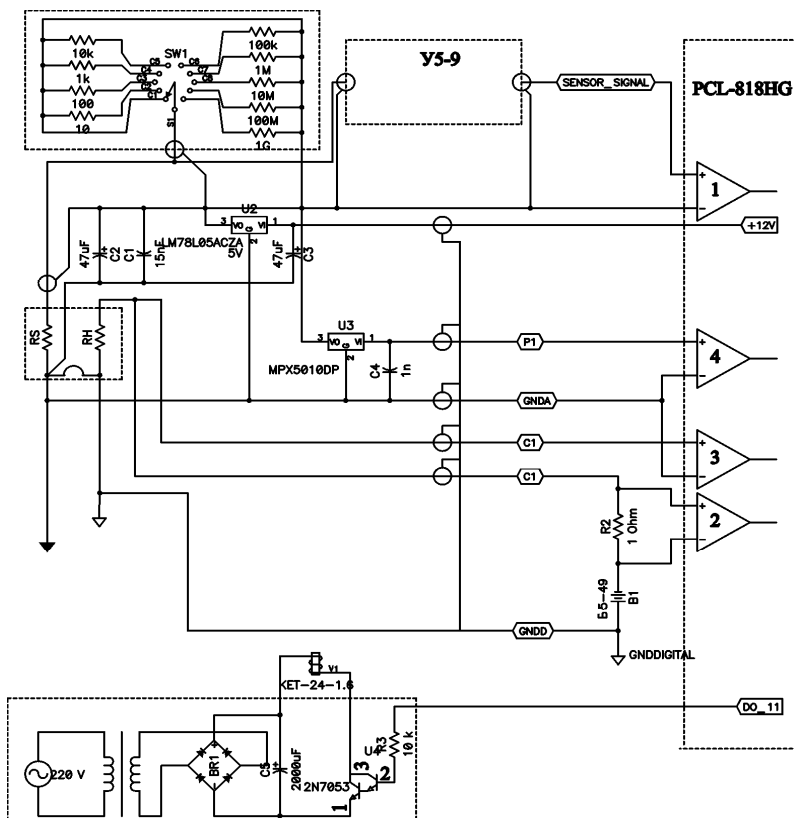


Рис. 2. Принципиальная монтажная схема соединений автоматизированной измерительной системы

Работа сенсора в восстановительной среде может сопровождаться дополнительным разогревом чувствительного элемента за счет каталитического окисления газа-восстановителя на его поверхности. В некоторых исследованиях этот эффект используется для селективного обнаружения различных газов при помощи одного сенсора [1]. Программное управление источником питания и процессом измерения позволяет исследовать как этот эффект, так и работу сенсора в различных режимах работы (например, при импульсном нагреве).

Каждое измерение представляется в виде массива из числовых результатов преобразований АЦП с заданным числом опросов по каналам. Данные по каждому каналу усредняются, и оценивается точность получаемых результатов по рассчитываемой среднеквадратической ошибке. При этом в режиме реального времени с заданным временным шагом на экране монитора отображаются любые из измеряемых параметров как в цифровом, так и в графическом виде, что делает процесс измерений наглядным и предоставляет информацию, необходимую для интерпретации проводимых измерений. Одновременно все получаемые данные записываются в файл Excel в виде таблицы. Окно программы во время проведения измерений показано на рис. 3.

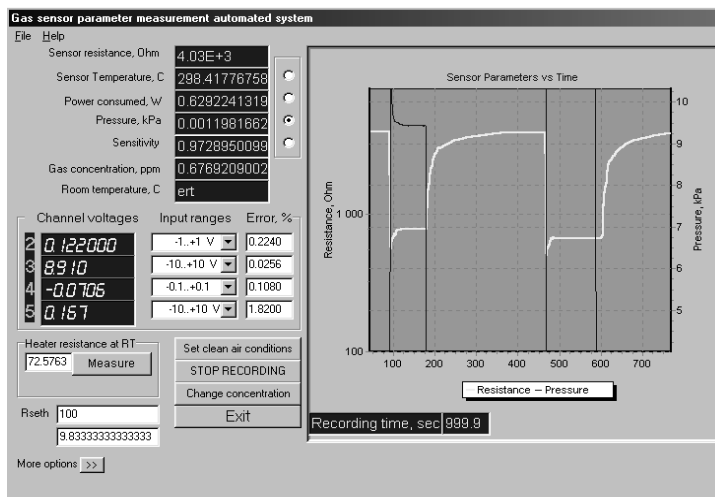


Рис. 3. Окно управляющей программы

С помощью созданной измерительной установки проведены тестовые измерения температурных характеристик разработанных нами металлооксидных сенсоров дыма [3]. Данные этих измерений подтвердили результаты, полученные нами ранее. В настоящее время проводятся тестовые измерения чувствительности, быстродействия и температурных характеристик сенсоров водорода на основе тонких пленок двуокиси олова, полученных по разработанной нами золь-гель технологии [5, 6]. В качестве примера представлены временные зависимости изменения сопротивления сенсора после введения (при $t = 4$ с) в измерительную камеру 0,5% водорода и при последующем его восстановлении в атмосфере чистого воздуха (рис. 4а). Время

реакции сенсора видно из графика на рис. 4б, где в увеличенном виде представлена область спада сопротивления, отмеченная фоном на рис. 4а.

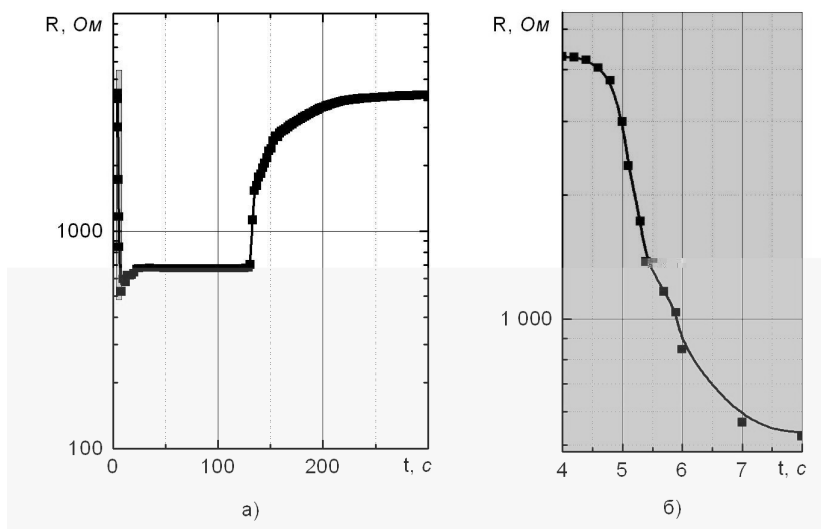


Рис. 4. Временные зависимости изменения сопротивления сенсоров водорода

Резюмируя полученные в данной работе результаты, можно сделать следующие выводы.

Создана необходимая новая измерительная база, на основе которой в режиме реального времени можно оперативно проводить исследования полученных образцов. Одновременно быстро и параллельно можно получить достоверную информацию как обо всех параметрах исследуемых объектов (чувствительность, времена отклика и восстановления, рабочая температура сенсора и др.), так и об изменениях параметров газовой среды в камере (давление газовой смеси ($\kappa\text{Па}$) и концентрация воздействующего на сенсор газа).

Все это позволяет в дальнейшем целенаправленно совершенствовать созданную технологию с целью улучшения физических и эксплуатационных параметров сенсоров, разрабатывать новые технологии создания чувствительных к разным газам полупроводниковых газовых сенсоров.

В заключение хотелось бы отметить отсутствие в литературе данных по созданию автоматизированной установки для измерения параметров газовых сенсоров, подобной нашей, возможно, из-за большой специфики проведения таких измерений в каждом конкретном случае.

Автор выражает благодарность В.М. Арутюняну и З.Н. Адамяну за руководство работой и полезные обсуждения результатов.

Работа выполнена в рамках республиканской целевой программы «Полупроводниковая наноэлектроника» (код-041030)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Heilig A., Barsan N., Weimar U., Gopel W. Selectivity enhancement of SnO_2 gas sensors: simultaneous monitoring of resistances and temperatures // S&A B. – 1999. – V. 58. – P. 302-309.
- Kohl D. Function and applications of gas sensors // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2001. – V. 34. – P. R125-R149.
- Adamyan A.Z., Adamian Z.N., Aroutiounian V.M. Smoke sensor with overcoming of humidity cross sensitivity // S&A B. – 2003. – V. 7032. – P. 1-6.
- Shukla S. et al Synthesis and characterization of sol-gel derived nanocrystalline tin oxide thin film as hydrogen sensor // S&A B. – 2003. – V. 96. – P. 343-353.
- Адамян А.З. Изготовление пленок из золи с наноразмерными частичками SnO_2 для создания газовых сенсоров // Мат. IV Нац. конференции, Цахкадзор. – 2003. – С. 180-183.
- Adamyan A.Z., Adamian Z.N., Aroutiounian V.M. Preparation of SnO_2 films with thermally stable nanoparticles // Sensors. – 2003. – V. 3. – P. 438-442.

ЕГУ. Материал поступил в редакцию 20.06.2005.

Ա. Զ. ԱԴԱՄՅԱՆ ԳԱԶԱՅԻՆ ՄԵՆՍՈՐՆԵՐԻ ՊԱՐԱՄԵՏՐԵՐԻ ԾՐԱԳՐԱՅԻՆ ՂԵԿԱՎԱՐՄԱՍԲ ԶԱՓՄԱՆ ՍԱՐՔ

Ներկայացվում է կիսահաղորդչային դիմադրական գազային սենսորների բնութագրերի չափման և վերահսկման համար ծրագրային ղեկավարմամբ ավտոմատացված սարք: Չափող համակարգի համար մշակված ծրագրային ապահովումը հնարավորություն է տալիս գրանցել սենսորների դիմադրության փոփոխությունները լայն տիրույթում՝ 10-ից մինչև 10^{12} Օհմ, ինչը տեղի է ունենում ինչպես արագ (~ 0.1 վ), այնպես էլ հնարավոր դանդաղ ընթացող պրոցեսների արդյունքում, կապված սենսորների բնութագրերի անկայունության կամ դեգրադացիայի հետ, նրանց երկարատև օգտագործման ժամանակ: Ներկայացվող սարքի օգնությամբ կարելի է հավաստի տեղեկություն ստանալ հետազոտվող սենսորների բոլոր բնութագրերի (զգայնություն, արձագանքի և վերականգնման ժամանակներ, սենսորի աշխատանքային ջերմաստիճան և այլն), ինչպես նաև խցիկի ներսում գազային միջավայրի պարամետրերի (գազային խառնուրդի ճնշում և սենսորի վրա ազդող գազի կոնցենտրացիա) փոփոխության մասին: Ներկայացվում են տվյալ սարքի օգնությամբ չափված մետաղ-օքսիդային ջրածնի սենսորների բնութագրերը:

Առանցքային բառեր. գազային տվիչ, տվյալների ստացման տպասալիկ, ավտոմատացված չափիչ սարքավորում:

A. Z. ADAMYAN SOFTWARE-CONTROLLED SETUP FOR GAS SENSOR PARAMETER MEASUREMENTS

The software-controlled automated setup for semiconductor resistive type of gas sensor parameter control and measurements is presented. The developed software of the measurement system allows to display the sensor resistance changes in the wide range (from 10 to 10^{12} Ohm), taking place as a result of fast-acting (~ 0.1 s) processes as well as possible long-term effects appeared with degradation or instability of sensor parameters during its usage. By means of the suggested setup it is possible to get the reliable information both about all parameters of the investigated sensors (sensitivity, response and recovery time sensor's operation temperature, etc.), and on gas mixture parameter changes into chamber (gas mixture pressure and concentration of the gas affecting the sensor). Measured by means of the presented setup metal-oxide hydrogen sensor parameters are shown.

Keywords: gas sensor, DAS card, automated measuring setup.

Ա.Ա. ՂԱՄԲԱՐՅԱՆ

ԱՐՅԱՆ ԶԱՐԿԵՐԱԿԱՅԻՆ ՃՆՇՄԱՆ
ՕՂԱԿԱԶԵՎ ՄԱԳՆԻՍԱԿԱՌԻՆ ԿԵՐՊԱՓՈԽԻՉ

Մշակվել և ուսումնասիրվել է արյան զարկերակային ճնշման մագնիսաձևկուն կերպափոխիչի ինքնատիպ կառուցվածք, կատարվել է դրա էլեկտրամեխանիկական հաշվարկը, որի հիման վրա պատրաստվել է փորձական նմուշ: Հստ տեսական և փորձական հետազոտությունների՝ կերպափոխիչը հաջողությամբ կարող է կիրառվել՝ մարդու մատերի վրա զարկերակային ճնշումը չափելու համար:

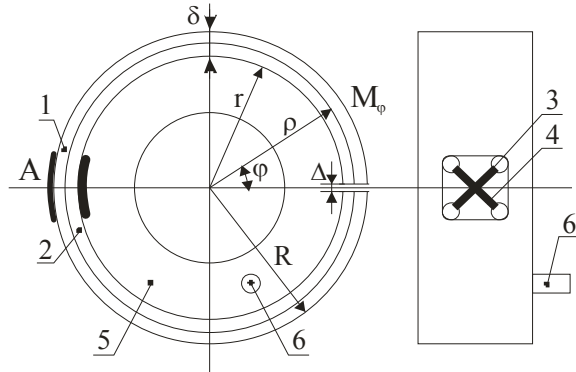
Առանցքային բառեր. մագնիսաձևկուն, հազեցման մագնիսաստրիկցիա, սիստոլային, դիաստոլային, ճնշում, մեխանիկական լարվածություն:

Արյան ճնշման չափման օղակաձև մագնիսաձևկուն կերպափոխիչի (ՃՕՄԿԿ) կառուցվածքը երկու պրոյեկցիաներով բերված է նկ.1-ում: Այն կազմված է իրար հետ կոշտ ամրացված (կետային զոդում) $\delta/2$ - հաստության 1 և 2 մագնիսաձևկուն նյութից թիթեղներից պատրաստված գլանաձև, ծնիչի ուղղությամբ զիզգազ Δ լայնությամբ բացակով միջուկից: Բացակին հանդիպակաց թիթեղների միացման գլանային չեզոք մակերևույթից դուրս՝ արտաքին 1 թիթեղի վրա բացված է քառակուսի անցք, որի կողերը զույգ առ զույգ զուգահեռ են գլանային միջուկի ծնիչին և հիմքերին, իսկ չեզոք մակերևույթից ներս ներքին 2 թիթեղի վրա բացված են արտաքին քառակուսի անցքի զագաթներով անցնող չորս անցքեր փաթույթների համար: Անկյունագծորեն հանդիպակաց զույգ անցքերով փաթաթվում են խաչաձև փոխուղղահայաց փաթույթները, գլանի ծնիչի նկատմամբ 45° անկյան տակ W_1 գալարների թվով 3 մագնիսացման առաջնային և 135° անկյան տակ 4 չափիչ երկրորդային $W_2=W_1$ գալարների թվով փաթույթները: Մագնիսացման փաթույթին տրվում է $U_1(t)$ կայուն ամպլիտուդի և հաճախության սինուսոիդային լարում, չափիչ փաթույթի վրա ձևավորվում է P ճնշման ուժով ամպլիտուդային մոդուլացված $e_2(t)$ էլՇՈՒ: Նշենք նաև, որ միջուկի արտաքին 1 գլանի պատրաստման թիթեղը կարելի է ընտրել ոչ մագնիսական (մագնիսաձևկուն) նյութից (օր.՝ տիտան), քանի որ այդ թիթեղն ապահովում է միայն ձգման դեֆորմացիա մագնիսազգայուն 2 թիթեղի համար, որի վրա բացված անցքերով էլ փաթաթված են կերպափոխիչի մագնիսացման և չափիչ փաթույթները: Բացի դրանից, միջուկը կարելի է պատրաստել նաև միաձույլ՝ մագնիսաձևկուն նյութի մեկ թիթեղից, որը կմեծացնի կառուցվածքի ամրությունը և աշխատանքի հուսալիությունը: Ճնշումը ՃՕՄԿԿ-ին փոխանցվում է դրա գլանաձև միջուկի ներքին պատին կպած օղակաձև տորոիդային սնամեջ հերմետիկ էլաստիկ 5 մանժետով, երբ հետազոտվողի մատը մտնում են դրա մեջ, մանժետի ներքին ծավալում օդամղիչին (տանձ) միացված 6 խողովակով օդ է մղվում և ստեղծվում է համապատասխան ավելցուկային P ճնշում:

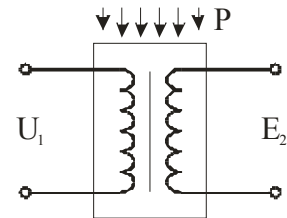
ՃՕՄԿԿ-ի միջուկի մեխանիկական սխեման ունի բաց շրջանագծային P ճնշման ազդեցությամբ ձկվող կառուցվածք, որտեղ ρ , ϕ - ն օղակի բևեռային կորդի-նատներն են (ըստ նկ.1-ի ρ – միջուկը կազմող 1 և 2 օղերի միացման գլանային

չեզոք մակերևույթի շառավիղն է, φ -ն – այն անկյունն է, որին համապատասխան որոշվում է M_φ ճկող մոմենտը՝ P ճնշման ազդեցությամբ):

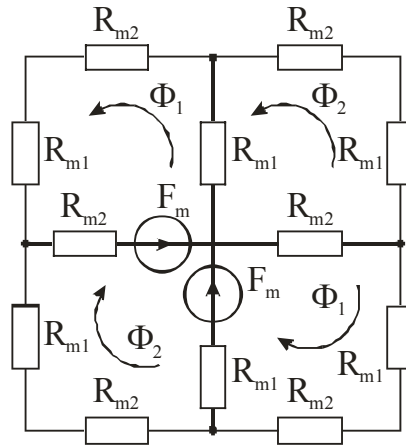
Նկ.2-ում բերված է ՃՕՄՃԿ-ի մագնիսական շղթայի փոխարինման սխեման, որտեղ $F_m = iW_1$ մագնիսացման փաթույթի ստեղծած մագնիսաշարժ ուժն է, երբ դրանով $U_1(t)$ լարման ազդեցությամբ հոսում է i սինուսոիդային հոսանք, R_{m1} , R_{m2} գլանաձև միջուկի մագնիսացման փաթույթի անցքերի շուրջը մագնիսական դիմադրություններն են՝ R_{m1} գլանի շրջանագծի ուղղությամբ, R_{m2} ծնիչի ուղղությամբ: Φ_1 -ը մագնիսացման փաթույթի անցքերի շուրջը փաթույթի ստեղծած մագնիսական հոսքն է, Φ_2 -ը՝ չափիչ փաթույթը P ճնշմանը համապատասխան հատող մագնիսական հոսքը:



Նկ.1



Նկ.3



Նկ.2

Նկ.3-ում բերված է ՃՕՄՃԿ-ի էլեկտրական համարժեք սխեման՝ որպես P ճնշումից կախված փոխինդուկտիվություններով տրանսֆորմատոր:

ՃՕՄՃԿ-ն աշխատում է հետևյալ կերպ: Իդեալական դեպքում ենթադրվում է, որ կերպափոխիչի կառուցվածքը ճիշտ սիմետրիկ է, ավելցուկային ճնշման բացակայության դեպքում միջուկի մագնիսաձկուն թիթեղների նյութը մագնիսապես համասեռ է՝ բոլոր կետերում բոլոր ուղղություններով ունի միևնույն $\mu_{սկ}$ սկզբնական մագնիսական թափանցելիություն: Այս դեպքում կերպափոխիչի մագնիսացման փաթույթի i -ի հոսանքի ստեղծած Φ_1 մագնիսական հոսքի ուժագծերը այդ փաթույթի անցքերի շուրջը կլինեն շրջանագծային, կշռշափեն չափիչ փաթույթին և չեն հատի դրան՝ $\Phi_2=0$, հետևաբար չափիչ փաթույթի վրա ԷԼՇՈՒ-ի չի առաջանա:

ՃՕՄՃԿ-ի միջուկի ներքին պատի և հետագոտվողի մատի միջև մանժետի ծավալում ահիրաժեշտ ավելցուկային P ճնշման առկայության դեպքում գլանաձև միջուկը կճկվի, բացակի Δ լայնությունը կմեծանա, հետևաբար միջուկի չեզոք մակերևույթից ներս 2 գլանը շրջանագծային ուղղությամբ կձգվի՝ մագնիսական թափանցելիությունը այդ ուղղությամբ կմեծանա, իսկ գլանի ծնիչի ուղղությամբ մեխանիկական լարվածություններ չեն առաջանա, ուրեմն այդ ուղղությամբ մագնիսական թափանցելիությունը գրեթե չի փոխվի: Այսպիսով, միջուկի ներքին 2 գլանը մագնիսապես կդառնա անհամասեռ, և Φ_1 մագնիսական հոսքի ուժագծերը մագնիսացման փաթույթի անցքերի շուրջը կդառնան էլիպսագծային, կհատեն չափիչ փաթույթը, դրանում կմակածեն սինուսոիդային $e_2(t)$ ԷԼՇՈՒ, որի ամպլիտուդը համեմատական է P ճնշման ուժին:

Նշենք նաև ՃՕՄՃԿ-ի պատրաստման ոչ կատարյալ տեխնոլոգիայի, ավելցուկային ճնշման բացակայության դեպքում միջուկի նյութի մագնիսական անհամասեռության պատճառով չափիչ փաթույթի էլքային լարումը տարբերվում է գրոյից, հետևաբար ճշգրիտ չափումներ կատարելու համար այդ լարումը պետք է չեզոքացնել:

Օգտվելով ՃՕՄՃԿ-ի համարժեք սխեմաներից՝ դուրս ենք բերում կերպափոխիչի էլքային ԷԼՇՈՒ-ի ճնշումից կախված ֆունկցիոնալ անալիտիկ ստատիկական հավասարումը՝ $E_{2m} = f(P) |_{U_{1m}=\text{const}}$: Նկ.2-ում բերված մագնիսական շղթայի համարժեք սխեմայի համաձայն՝ չափիչ փաթույթը հատող Φ_2 մագնիսական հոսքը որոշվում է հետևյալ բանաձևով՝

$$\Phi_2 = \Phi_1 \frac{R_{m2} - R_{m1}}{2(R_{m2} + R_{m1})} = \Phi_1 \frac{\Delta\mu}{2\mu_{սկ} \left(2 + \frac{\Delta\mu}{\mu_{սկ}} \right)}, \quad (1)$$

$$\text{որտեղ } \Phi_1 = \frac{F_m}{2(R_{m1} + R_{m2})}; \quad R_{m1} = \frac{l_{միջ}}{4\mu_1 S}; \quad R_{m2} = \frac{l_{միջ}}{4\mu_2 S};$$

$$\mu_1 = \mu_{սկ} + \Delta\mu; \quad \mu_2 = \mu_{սկ}; \quad \frac{\Delta\mu}{\mu_{սկ}} = \frac{2\lambda_S \mu_{սկ}}{B_S^2} \sigma; \quad \frac{\lambda_S \mu_{սկ}}{B_S^2} = a_S:$$

որտեղ $\Delta\mu$ - ն մագնիսական թափանցելիության բացարձակ փոփոխությունն է միջուկի գլանի շրջանագծային ուղղությամբ՝ չափվող P ճնշման մեծությանը համեմատական $\Delta\mu/\mu_{սկ}$ - ը՝ միջուկի նյութի թափանցելիության հարաբերական փոփոխությունը գլանի շրջանագծային ուղղությամբ՝ P ճնշումից առաջացած σ

մեխանիկական լարվածության ազդեցությամբ, λ_s -ը՝ հագեցման մագնիսաստրիկցիայի գործակիցը, B_s -ը՝ հագեցման ինդուկցիան:

Դուրս բերենք կապը σ մեխանիկական լարվածության և չափվող P ճնշման միջև: ϕ անկյան տակ ռադիալ կտրվածքում M_ϕ ճկող մոմենտը որոշվում է հետևյալ բանաձևով՝

$$M_\phi = b\phi\rho^2 \sin(\phi/2)P : \quad (2)$$

ϕ անկյան տակ գլանի շրջանագծային ուղղությամբ մեխանիկական լարվածությունը որոշվում է հետևյալ բանաձևով՝

$$\sigma_\phi = \frac{M_\phi}{W} = \frac{6b\phi\rho^2 \sin(\phi/2)}{b\delta^2}P, \quad W = \frac{b\delta^2}{6}, \quad (3)$$

միջին մեխանիկական լարվածությունը գլանի պատի ϕ անկյան տակ կտրվածքում՝

$$\sigma_{\phi \text{ միջ}} = \frac{\sigma_\phi}{2} = \frac{3\phi\rho^2 \sin(\phi/2)}{\delta^2}P, \quad (4)$$

որտեղ $\rho = r + \delta/2 = R - \delta/2$:

ՃՕՄՃԿ-ի փաթույթներն ընդգրկում են A կետի մերձակա տիրույթը, հետևաբար միջին մեխանիկական լարվածությունները որոշում ենք այդ կետում:

A կետի համար՝ $\phi = \pi$, հետևաբար

$$\sigma_A = \sigma_\pi = 3\pi\left(\frac{\rho}{\delta}\right)^2 P : \quad (5)$$

Տեղադրում ենք մագնիսական թափանցելիության հարաբերական փոփոխության և σ_A մեխանիկական լարվածության P ճնշումից կախված արժեքները չափիչ փաթույթը հատող մագնիսական հոսքի բանաձևում և համարժեք անցում ենք կատարում չափիչ փաթույթների էլՇՈՒ-ի ամպլիտուդի բանաձևին.

$$E_{2m} = \frac{1,5U_{lm}\pi(\rho/\delta)^2 a_s P}{1 + 3\pi(\rho/\delta)^2 a_s P} : \quad (6)$$

Կերպափոխման հավասարումից երևում է, որ ՃՕՄՃԿ-ի չափիչ փաթույթի ելքային էլՇՈՒ-ի ամպլիտուդը չափվող P ճնշումից կախված է ոչ գծայնորեն: Կախվածության ոչ գծայնությունը այնքան ավելի փոքր կլինի, որքան փոքր լինեն $(\lambda_s \mu_{\text{սկ}}/B_s^2) = a_s$ և $(\rho/\delta)^2$ գործակիցները: Միաժամանակ այդ գործակիցների փոքր լինելը հանգեցնում է կերպափոխիչի $\Delta E_2/\Delta P$ զգայունության փոքրացման: Հետևաբար, ՃՕՄՃԿ-ի միջուկի նյութի և չափերի ընտրությունը, համաձայն (6)-ի, պետք է կատարել փոխզիջման եղանակով՝ համակարգչի օգնությամբ:

ՃՕՄՃԿ-ի նախագծման, էլեկտրամեխանիկական հաշվարկի և պատրաստման համար հիմք են հետազոտվողի արյան զարկերակային ճնշումը կերպափոխիչին փոխանցող մանժետում՝ առավելագույն $P_{\text{max}}=300$ մմ ս.ս.բ $=0,04$ Ն/մմ² և նվազագույն $P_{\text{min}}=20$ մմ ս.ս.բ $=0,0026$ Ն/մմ² ճնշման արժեքները, կերպափոխիչի կառուցվածքային, փոխարինման համարժեք սխեմաներից:

Համաձայն կերպափոխիչի կառուցվածքային սխեմայի՝ որոշում ենք դրա օղակաձև գլանային միջուկի չափերը՝ օգտվելով մեխանիկական լարվածության և մանժետում գործող ավելցուկային ճնշման միջև կապի (5) բանաձևից՝ միջուկի գլանի $\phi=\pi$ անկյան տակ կտրվածքում, որտեղ մեխանիկական լարվածությունն ունի առավելագույն արժեք.

$$\sigma_{\pi}^{\max} = 6\pi \left(\frac{\rho}{\delta} \right)^2 P_{\max}, \quad (7)$$

մանժետում ճնշման առավելագույն արժեքի դեպքում՝ $P_{\max}=0,04$ Ն/մմ², ընդունում ենք առավելագույն մեխանիկական լարվածությունը՝ $\sigma_{\pi}^{\max}=40$ Ն/մմ², ընտրում օղակաձև գլանի չեզոք մակերևույթի շառավիղը՝ $\rho=20$ մմ և որոշում միջուկի պատի δ հաստությունը.

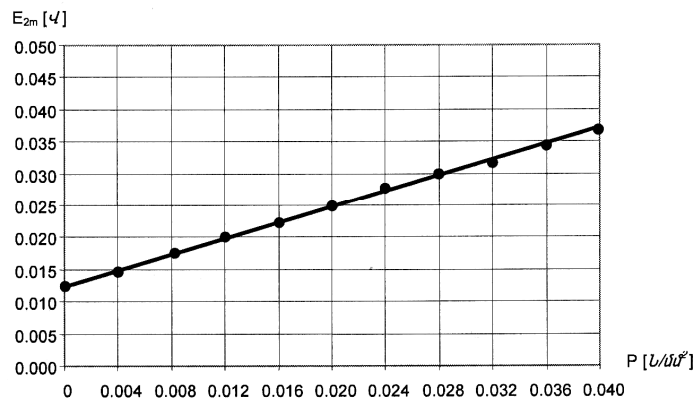
$$\delta = \rho \sqrt{\frac{6\pi P_{\max}}{\sigma_{\pi}^{\max}}} = 20 \sqrt{\frac{6 \cdot 3,14 \cdot 0,04}{40}} = 2,76 \text{ մմ}:$$

Ընտրում ենք $\delta = 2,4$ մմ, միջուկի թիթեղների հաստությունը՝ $\delta/2=1,2$ մմ, գլանի արտաքին շառավիղը՝ $R=\rho+\delta/2=21,2$ մմ, ներքին շառավիղը՝ $r=\rho-\delta/2=18,8$ մմ:

Ընտրում ենք նաև միջուկի մագնիսաձկուն նյութը 44HXTIO մակնիշի, որի մագնիսաձկուն հաստատուններն են՝ հագեցման մագնիսաստրիկցիայի գործա-կիցը՝ $\lambda_s=40 \cdot 10^{-6}$, հագեցման ինդուկցիան՝ $B_s=2,4$ Տ:

Օգտվելով ընտրված նյութի մագնիսացման $B=f(H)$ բնութագրից՝ որոշում ենք վերջինիս առավելագույն սկզբնական մագնիսական թափանցելիությունը՝ $\mu_{սկ}=2,5 \cdot 10^{-3}$ Հն/մ:

Ընտրում ենք միջուկի 2 թիթեղի վրա փաթույթների համար բացված չորս անցքերի տրամագիծը՝ $d=3,5$ մմ, անցքերի միջև, անցքերի և գլանի հիմքերի միջև հեռավորությունները՝ $t=4$ մմ, միջուկի գլանի (ծնիչի) երկարությունը՝ $b=2d+3t=19$ մմ:



Նկ.4

Որոշված չափերով, 44HXTIO մակնիշի մագնիսաձկուն պողպատի թիթեղներից պատրաստված միջուկի անցքերով փաթաթված են $W_1=W_2=100$ գալարների թվով փաթույթներ, որոնցից մագնիսացման փաթույթին տրված սինուսոիդային լարման ամպլիտուդի $U_{1m}=1$ Վ և հաճախության $f_{ս}=300$ Հց արժեքների դեպքում ՃՕՄՃԿ-ի պատրաստված փորձնական նմուշի հետազոտման արդյունքում ստացված կերպափոխման $E_{2m} = f(P) |_{U_{1m}=\text{const}}$ ելքային ստատիկական բնութագիրն ունի նկ. 4-ում բերված տեսքը: Բնութագրի ոչ գծայնությունը չի

գերազանցում 1%-ը, մեխանիկական հիստերեզիսը՝ 0,2%-ը: Սկզբնականում բնութագիրը չի անցնում, այսինքն մանժետում ճնշման բացակայության դեպքում չափիչ փաթույթի ելքային էլԵՌ-ն բացակայում է՝ պայմանավորված պատրաստման տեխնոլոգիայի ոչ կատարյալ լինելով և միջուկի նյութի մագնիսական անհամասեռությամբ: Կերպափոխիչի զգայունությունը կազմում է $\Delta E_{2m}/\Delta P=0,6$ Վ. մմ²/Ն՝ համաձայն փորձնական ելքային բնութագրի:

Կատարված տեսական և փորձնական հետազոտությունները ցույց են տալիս, որ նախագծված և մշակված ինքնատիպ ՃՕՄՃԿ-ն հաջողությամբ կարող է կիրառվել որպես հետազոտվողի արյան զարկերակային ճնշման առաջնային կերպափոխիչ:

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. **Левшина Е.С., Новицкий П.В.** Измерительные преобразователи - М.: Энергоатомиздат, 1983. – 312 с.
2. **Твердин Л.М., Панченко В.М., Закорюкин В.Б.** Автоматические устройства с магнитоупругими преобразователями. – М.: Энергия, 1974. - 129 с.

ՀՊՃՀ: Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 15.03.2005:

Ա.Ա. ГАМБАРЯН

КОЛЬЦЕВОЙ МАГНИТОУПРУГИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ АРТЕРИАЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ КРОВИ

Разработана и исследована конструкция магнитоупругого преобразователя артериального давления крови. Выполнен электромеханический расчет преобразователя, на основании которого изготовлен опытный образец. Теоретические и экспериментальные исследования показывают, что преобразователь успешно может быть применен для измерения артериального давления на пальцах пациента.

Ключевые слова: магнитоупругий, магнитострикция насыщения, систолическое, диастолическое, давление, механическое напряжение.

A.A. GHAMBARYAN

CIRCULAR MAGNETOELASTIC TRANSFORMER OF BLOOD PRESSURE

The construction of magnetoelastic transformer of blood pressure is worked out and studied. The electromechanic calculation of the transformer is carried out, as a result the experimental sample is constructed. The theoretical and experimental investigations show that the transformer can be successfully used for the measurement of blood pressure on the patient's finger.

Keywords: magnetoelastic, magnitostriktion, systolic, diastolic, pressure, mechanical stress.

С. Н. МАНУКЯН, А. В. ТАТЕВОСЯН, Н. В. МИКАЕЛЯН

**АЛГОРИТМ ПОСТРОЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОГО РЕЖИМА ВЕДЕНИЯ
ТЕПЛООБМЕННОГО ПРОЦЕССА**

Предложены варианты постановки задачи оптимизации теплообменного процесса и дан алгоритм их решения. Работа теплообменного аппарата представлена в виде многоступенчатого процесса, для которого предложена целевая функция. Рассмотрены управляющие воздействия и дана модель каждой ступени процесса.

Ключевые слова: теплообменный процесс, переменные состояния, управляемые переменные, оптимизация теплообменного процесса, минимальные суммарные затраты.

Основным звеном теплообменного процесса в технологической цепи реально действующего химического производства является теплообменный аппарат, предназначенный для осуществления изменения энтальпии различных технологических потоков путем обеспечения теплообмена без их физического смешивания. Теплообменные установки обычно функционируют в заданных диапазонах изменения параметров, предварительно установленных регламентом производства. Поэтому даже незначительная коррекция их работы может привести к существенным выгодам с точки зрения их производительности и многолетней эксплуатации.

Работу теплообменного аппарата во времени можно представить как некий многоступенчатый процесс, каждая ступень которого отображается конечным отрезком времени. Желаемые изменения переменных состояния ($X = X_1, X_2, \dots, X_p$) достигаются путем манипуляций управляющими переменными ($U = U_1, U_2, \dots, U_m$). Изменения, происходящие на каждой ступени (рис.1), определяются системой уравнений преобразования

$$X^i = F(X^{i-1}, U^i), \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (1)$$

где n - число разбиений срока службы аппарата на интервалы времени.

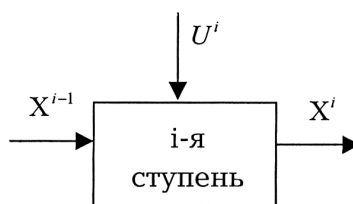


Рис.1

В задачах оптимизации многоступенчатых управляемых процессов целевую функцию принято представлять как функцию от переменных состояния на выходе последней или всех ступеней. Тогда возможна следующая классическая постановка задачи оптимизации.

Для процесса с известными уравнениями преобразования, начальными и конечными значениями отобранных переменных состояния на каждой ступени найти такие удовлетворяющие заданным ограничениям значения управляющих переменных, при которых целевая функция достигнет своего экстремального значения.

Предположим, теплообменный аппарат, функционирующий в стационарном режиме работы технологической схемы в течение конечного интервала времени $\Delta\tau_i$, характеризуется постоянными значениями параметров потоков: T^{i_n} , T_k – начальное и конечное значения температур целевого потока; t^{i_n} , t^i_k – начальное и конечное значения температур побочного потока; G_r – расход целевого потока; G^i_t – расход побочного потока; C^i_t – себестоимость единицы побочного потока; Z^i – затраты на процесс теплообмена за период времени $\Delta\tau_i$; K^i – среднее значение суммарного коэффициента теплопередачи за время $\Delta\tau_i$; L^i – средняя суммарная толщина разделяющей стенки между двумя потоками для интервала $\Delta\tau_i$.

Согласно предусмотренным регламентом условиям ведения процесса, управление теплообменником осуществимо:

- выбором t^{i_n} из дискретного набора вариантов, если география и технологическое окружение исследуемого процесса создают предпосылки для использования имеющихся оборотных и природных водных ресурсов ;
- регулировкой G^i_t ;
- параллельно обоими параметрами.

При промышленной эксплуатации аппарата возникает необходимость периодической остановки забитого осадками теплообменника для его капитальной или текущей очистки. Это обусловлено тем, что значение суммарного коэффициента теплопередачи стабильно уменьшается в силу постоянного утолщения разделительных стенок термоизоляционными осадками со стороны каждого из потоков. (Динамика изменения коэффициента теплопередачи будет обсуждена ниже). Время непрерывной работы теплообменника определяется как

$$\tau = \sum_{i=1}^n \Delta\tau_i. \quad (2)$$

С учетом принятых допущений и обозначений для непрерывного процесса теплообмена, имитированного в виде дискретного во времени многоступенчатого процесса (рис.2), возможна постановка одной из нижеперечисленных задач.

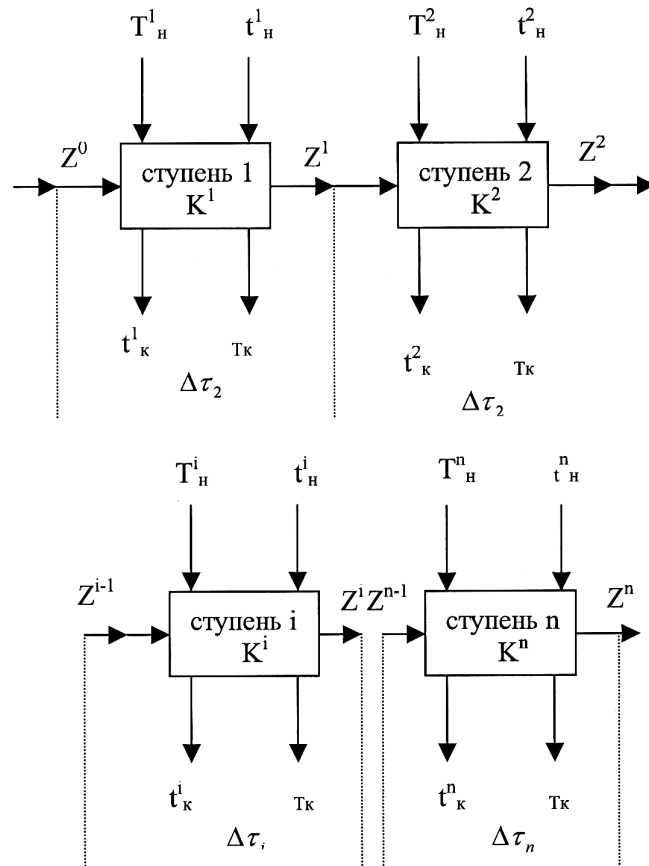


Рис.2

Задача 1. Для известного количества ступеней (интервалов времени $\Delta \tau_i$), функций K^i и установленных из заданного регламентом дискретного множества t_n значений параметров потоков построить такой вектор $t_n = (t_n^1, t_n^2, \dots, t_n^n)$, чтобы суммарные затраты Z^i , $i = 1, 2, \dots, n$ на процесс теплообмена были минимальными не только для каждой ступени, но и для всего промежутка безостановочного времени работы аппарата

$$\sum_{i=1}^n Z^i.$$

Задача 2. Для условий и требований задачи 1 дополнительно вводится ограничение на максимально возможный расход ($G^{\max_t}$) вторичного теплоагента, являющийся дискретной функцией от t_n и времени.

Задача 3. В отличие от задачи 2, в роли второй управляющей переменной выступает число ступеней (n) или количество разбиений τ на $\Delta\tau_i$.

Задача 4 (относительно общая). В дополнение к условиям задачи 3 предлагается определить не только n и вектор t_n , но также и вектор $\Delta\tau\{\Delta\tau_1, \Delta\tau_2, \dots, \Delta\tau_n\}$, принимая во внимание неравномерность разбиения по τ . Иначе говоря, требуется весь срок службы теплообменника τ разбить на такие неравномерные, но оптимально подобранные временные отрезки, чтобы после выбора (из заданного множества) для каждого $\Delta\tau_i$ соответствующего и опять-таки оптимальных t_n суммарные затраты на процесс теплообмена были бы минимальными.

При подборе метода решения любой из поставленных задач следует учесть основную отличительную особенность рассматриваемого процесса.

Управляющие воздействия (в частности, значения t_n) не принадлежат к классу непрерывных функций. Они дискретны и строго ограничены климатическими и технологическими условиями. Кроме того, почти на все переменные процесса наложены ограничения типа неравенств. Решение подобных задач успешно реализуемо при применении дискретного принципа максимума Понтрягина [1,2].

Возвращаясь к исходным условным обозначениям, привяжем их к переменным, характеризующим процесс теплообмена.

В общем случае, в качестве определяющего переменного состояния X можно принять толщину разделительной стенки в теплообменнике Δl или некую функцию от него, например, $K^i(\Delta l^i)$ или $Z^i(\Delta l^i)$. Изменение толщины разделительной стенки за счет осадений определится условиями ведения и другими параметрами состояния процесса:

$$l^i = \varphi(X^{i-1}, U^i). \quad (3)$$

В качестве управляющего воздействия может служить вектор U с компонентами t_n и $\Delta\tau$. Если предположить, что вся необходимая для расчетов информация содержится в заранее организованной базе данных, то модель каждой ступени рассматриваемого процесса $F(X^{i-1}, U^i)$ будет представлять собой множество теоретических, полуэмпирических, эмпирических соотношений и уравнений, экспериментальных и прочих данных, объединенных в конечный алгоритм, обслуживаемый системой управления этой базой. Итогом реализации модели $F(X^{i-1}, U^i)$ при рассмотренной постановке станут, например, значения затрат на процесс теплообмена за заданный промежуток времени.

Если состояние процесса характеризуется r -мерным вектором X , преобразуемым на каждой ступени в соответствии с избранным на данной ступени m -мерным управлением, и преобразование X на i -й ступени описывается системой уравнений (1), то задача оптимизации будет заключаться в определении последовательности U^i , минимизирующих

$$\Phi = \sum_{j=1}^p A_j X_j^n, \quad (4)$$

где A_j – заданные весовые коэффициенты.

Решение такой задачи на основе дискретного принципа максимума [3,4] требует введения p -мерного сопряженного вектора и функции Гамильтона H^i , удовлетворяющих соотношениям (1):

$$H^i = \sum_{j=1}^p \lambda_j^i F_j^i(X^{i-1}, U^i), \quad i = 1, 2, \dots, n; \quad j = 1, 2, \dots, p, \quad (5)$$

$$\lambda_j^{i-1} = \frac{\partial H^i}{\partial X_j^{i-1}}, \quad (6)$$

$$\lambda_j^n = A_j, \quad (7)$$

и определения оптимальной последовательности U^i из условий

$$\frac{\partial H^i}{\partial U^i} = 0, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (8)$$

Поскольку, согласно принятым допущениям, исследуемый многоступенчатый процесс имеет аддитивную целевую функцию, то строится расширенный процесс с дополнительной переменной состояния X_{p+1} , определенной условиями

$$X_{p+1}^0 = 0, \quad X_{p+1}^i = \sum_{i=1}^n f(X^{i-1}, U^i).$$

Отсюда следует, что переменная состояния X_{p+1} удовлетворяет уравнению преобразования

$$X_{p+1}^i = X_{p+1}^{i-1} + f(X^{i-1}, U^i). \quad (9)$$

Таким образом, уравнения (4) – (8) полностью определяют построенный расширенный процесс.

Теперь остановимся на частном случае решения (4)–(8) и рассмотрим случай простого, одномерного процесса [4] (процесс полностью охарактеризован одной переменной состояния t_n , $p=1$). Целевую функцию определим как $\sum_{i=1}^n f(X_1^{i-1}, U^i)$.

Введем новую переменную состояния

$$X_2^i = X_2^{i-1} + f(X_1^{i-1}, U^i) \quad \text{и} \quad X_2^0 = 0. \quad (10)$$

Тогда задача сводится к определению последовательности U_k , $k=1, 2, \dots, m$, максимизирующей значение $X_2^n = \sum_{i=1}^n f(X_1^{i-1}, U^i)$ на последней ступени.

Функция Гамильтона запишется в виде

$$H^i = \lambda_1^i F(X_1^{i-1}, U^i) + \lambda_2^i [X_2 + f(X_1^{i-1}, U^i)].$$

В соответствии с (6) имеем

$$\begin{cases} \lambda_1^{i-1} = \frac{\partial F(X_1^{i-1}, U^i)}{\partial X_1^{i-1}} \lambda_1^i + \frac{\partial f(X_1^{i-1}, U^i)}{\partial X_1^{i-1}} \lambda_2^i, & i = 1, 2, \dots, n, \\ \lambda_2^{i-1} = \frac{\partial X_2^{i-1}}{\partial X_2^{i-1}} \lambda_2^i = \lambda_2^i. \end{cases} \quad (11)$$

Поскольку целевая функция определяется в виде

$$S = \sum_{j=1}^2 A_j X_j^n = X_2^n,$$

то $A_1=0$ и $A_2=1$. В соответствии с граничным условием (7) имеем

$$\lambda_1^n = 0, \lambda_2^n = 1.$$

Подставляя полученные коэффициенты в (11), получим

$$\begin{cases} \lambda_2^i = 1 \\ \lambda_1^{i-1} = \frac{\partial F(X_1^{i-1}, U^i)}{\partial X_1^{i-1}} \lambda_1^i + \frac{\partial f(X_1^{i-1}, U^i)}{\partial X_1^{i-1}} \end{cases} \quad (12)$$

То есть

$$H_i = \lambda_1^i F(X_1^{i-1}, U^i) + f(X_1^{i-1}, U^i) + X_2^{i-1}$$

и в соответствии с (8):

$$\frac{\partial H^i}{\partial U^i} = \lambda_1^i \frac{\partial F(X_1^{i-1}, U^i)}{\partial U^i} + \frac{\partial f(X_1^{i-1}, U^i)}{\partial U^i} = 0.$$

Решая это уравнение относительно λ_1^i , находим

$$\lambda_1^i = \frac{\frac{\partial f(X_1^{i-1}, U^i)}{\partial U^i}}{\frac{\partial F(X_1^{i-1}, U^i)}{\partial U^i}}. \quad (13)$$

Записав (11) для i -го звена, получим

$$\lambda_1^i = \frac{\partial F(X_1^i, U^{i+1})}{\partial X_1^i} \lambda_1^{i+1} + \frac{\partial f(X_1^i, U^{i+1})}{\partial X_1^i}.$$

Подставив сюда (13), получим

$$\frac{\frac{\partial f(X_1^{i-1}, U^i)}{\partial U^i}}{\frac{\partial F(X_1^{i-1}, U^i)}{\partial U^i}} = \frac{\frac{\partial f(X_1^i, U^{i+1})}{\partial U^{i+1}}}{\frac{\partial F(X_1^i, U^{i+1})}{\partial U^{i+1}}} \frac{\partial F(X_1^i, U^{i+1})}{\partial X_1^i} + \frac{\partial f(X_1^i, U^{i+1})}{\partial X_1^i}. \quad (14)$$

И, наконец, для $i=0$:

$$\lambda_1^0 = \frac{\frac{\partial f(X_1^0, U^1)}{\partial U^1}}{\frac{\partial F(X_1^0, U^1)}{\partial U^1}} \frac{\partial F(X_1^0, U^1)}{\partial X_1^0} + \frac{\partial f(X_1^0, U^1)}{\partial X_1^0}. \quad (15)$$

Уравнение (14) является рекуррентным соотношением для определения оптимального управления и соответствующих ему переменных состояния. Процедура вычислений начинается с последнего звена.

Задаваясь значением X_1^n и решая совместно уравнения (1) и (16) :

$$\frac{\partial f(X_1^{n-1}, U^n)}{\partial U^n} = 0, \quad (16)$$

определяются X_1^{n-1} и U^n с учетом того, что уравнение (16) соответствует условию оптимальности управления на последнем звене.

Далее, имея X_1^{n-1} , совместно решаются (1) и (14), находятся X_1^{n-2} , U^{n-2} и т. д., до вычисления X_1^0 .

После корректировки X_1^n процедура повторяется до тех пор, пока рассчитанное значение X_1^0 не станет равно заданному.

Практическую реализацию теоретического обоснования применим к поставленной в начале изложения задаче 1.

Запишем уравнение теплового баланса для i -й ступени [5]:

$$G_t C_{pt} (T_n - T_k) = G_t^i C_{pt} (t_k^i - t_n^i). \quad (17)$$

Приравнявая количество теплоты, приобретенной на i -й ступени первым потоком через теплопередачу от второго потока, получим

$$G_t C_{pt} (T_n - T_k) = K^i P (T_k - t_k^i), \quad (18)$$

где P — поверхность теплообмена теплообменника.

Последнее уравнение разрешимо относительно K^i :

$$K^i = \frac{G_t C_{pt} (T_n - T_k)}{P (T_k - t_k^i)}. \quad (19)$$

Существует и другое общепринятое выражение для вычисления коэффициента теплопередачи через коэффициенты теплоотдачи и теплопередачи [5]:

$$K^i = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1^i} + \frac{1}{\alpha_2^i} + \frac{l_i}{\lambda_c^i}}, \quad (20)$$

где λ_c^i — усредненное значение коэффициента теплопроводности комбинированной разделяющей стенки между потоками.

Допуская постоянство скорости роста общей толщины разделяющей стенки, при заданных условиях за время $\Delta \tau_i$ можно записать

$$l_i = l_{i-1} + \Delta l_i,$$

где $\Delta l_i = a^i \Delta \tau_i$, a^i — коэффициент, характеризующий скорость наращивания толщины разделяющей стенки с обеих сторон.

Управляющей переменной является тип охлаждающего потока. Он характеризуется значением t_n^i , и, при прочих неизменных условиях, именно им возможна регулировка Δl_i . Принимая допущение о линейности характера зависимости

$$a^i = b^i t_n^i, \quad (21)$$

где b^i – константа, определяемая t_n^i , нетрудно получить рекуррентное соотношение для расчета K_i :

$$K^i = \frac{K^{i-1} - \lambda_c^i}{\lambda_c^i + K^{i-1} \cdot b^i \Delta \tau_i \cdot t_n^i}. \quad (22)$$

Введем новую переменную Z_i , удовлетворяющую уравнениям преобразований и начальному условию:

$$Z^i = Z^{i-1} + \varphi(K^{i-1}, t_n^i) \text{ и } Z^0 = 0, \quad (23)$$

где φ — затраты на процесс теплообмена за промежуток времени $\Delta \tau_i$:

$$\varphi(K^{i-1}, t_n^i) = C_t^i(t_n^i) \cdot G_t^i(t_n^i). \quad (24)$$

Здесь $C_t^i(t_n^i) = d^i t_n^i$, а d^i — постоянный множитель, определяемый типом охлаждающего потока.

Из (17) и (18) находим

$$G_t^i = \frac{G_T C_{PT}(T_H - T_K)}{C_{PT}(t_K^i - t_n^i)}, \quad t_K^i = T_K - \frac{G_T C_{PT}(T_H - T_K)}{K^{i-1} P}.$$

Отсюда

$$G_t^i = \frac{A}{T_K - t_n^i - \frac{B}{K^{i-1}}},$$

$$\text{где } A = G_T \frac{C_{PT}}{C_{PT}}(T_H - T_K), \quad B = C_{PT} \frac{G_T}{P}(T_H - T_K),$$

$$\varphi(K^{i-1}, t_n^i) = \frac{A}{T_K - t_n^i - \frac{B}{K^{i-1}}}. \quad (25)$$

Далее сведем задачу к стандартной, в которой, выбирая последовательность t_n^i , $i=1,2,\dots,n$, минимизируется значение Z^n .

Путем сопоставления уравнений (21) и (23) с (1) и (10) получим

$$\begin{cases} F(K^{i-1}, t_n^i) = \frac{K^{i-1} \lambda_c^i}{\lambda_c^i + K^{i-1} \cdot b^i t_n^i \Delta \tau_i}, \\ f(K^{i-1}, t_n^i) = C_t^i G_t^i = \frac{d^i A t_n^i}{T_K - t_n^i - \frac{B}{K^{i-1}}}. \end{cases} \quad (26)$$

Определив частные производные выражений (26) от t^i_n , t^{i+1}_n и K^i и подставив в (14), получим трансцендентное уравнение

$$\Phi(K^{i-1}, K^i, t^i_n, t^{i+1}_n) = 0, \quad (27)$$

совместное решение которого с (17) или (18) аналитическими методами невозможно ввиду сильной нелинейности соответствующих частных производных. В силу этого предлагается алгоритм приближенного решения.

Зафиксировав значение K^n (задавшись взятым из регламента данных значением l^n), определяются t^n_n и K^{n-1} путем совместного решения уравнений (22) и (16):

$$\begin{cases} K^n = \frac{K^{n-1} \lambda_c^n}{\lambda_c^n + K^{n-1} b^n \Delta \tau_n t_H^n}, \\ \frac{T_k - B / K^{n-1}}{Ad^n \left(T_k - t_H^n - B / K^{n-1} \right)^2} = 0. \end{cases},$$

Соответствующие значения t^i_n при $i=n-1, n-2, \dots, 2, 1$ определяются путем совместного решения рекуррентного соотношения (27) и исходного уравнения (22). Цикл вычислений от конца цепочки к началу повторяется до тех пор, пока вычисленное значение $K^0_{\text{расч}}$ не будет близко (с точностью до заданного ε) к заданному $K^0_{\text{зад}}$. Полученный набор значений $t^1_n, t^2_n, \dots, t^n_n$, очевидно, будет соответствовать оптимальному, в смысле минимума затрат на суммарные расходы охлаждающего потока из возможного списка альтернативных источников.

Завершается расчет вычислением минимального значения переменных расходов по охлаждающему потоку согласно (24).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Болтянский В.Г., Гамкрелидзе Р.В., Понтрягин Л.С. ДАН СССР.– 1956. –110, N 1.
2. Понтрягин Л.С., Болтянский В.Г., Гамкрелидзе Р.В., Мищенко Е.Ф. Математическая теория оптимальных процессов. – М.: Физматгиз, 1961.
3. Бояринов А.И., Кафаров В.В. Методы оптимизации в химической технологии. – М.: Химия, 1969.
4. Фан Л.Ц., Вань Ч.С. Дискретный принцип максимума. – М.: Мир, 1967.
5. Павлов К.Ф., Романков П.Г., Носков А.А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии.- Л.: Химиздат, 1987. - 576 с.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 19.07.2004.

Ս.Ն. ՄԱՆՈՒԿՅԱՆ, Ա.Վ. ԹԱԴԵՎՈՍՅԱՆ, Ն.Վ. ՄԻՔԱՅԵԼՅԱՆ

ՋԵՐՄԱՓՈԽԱՆԱԿՄԱՆ ՊՐՈՑԵՍԻ ՎԱՐՄԱՆ ՕՊՏԻՄԱԼ ՌԵԺԻՄԻ ԱԼԳՈՐԻԹՄԻ ԿԱՌՈՒՑՈՒՄ

Առաջարկված են ջերմափոխանակման պրոցեսի լավարկման խնդրի առաջադրման տարբերակները և դրանց լուծման ալգորիթները: Ջերմափոխանակման ապարատի աշխատանքը ներկայացված է բազմաստիճան պրոցեսի ձևով, որի համար առաջարկվում է նպատակային ֆունկցիա: Դիտարկված են կառավարման փոխազդեցությունները և տրված է ջերմանցման պրոցեսի յուրաքանչյուր աստիճանի մոդելը:

Առանցքային բառեր. ջերմափոխանակման պրոցես, իրավիճակների փոփոխականներ, կառավարման փոփոխականներ, ջերմափոխանակման պրոցեսի լավարկում, գումարային ծախսերի նվազարկում:

S.N. MANUKYAN, A.V. TATEVOSYAN, N.V. MIKAELIAN

ALGORITHM OF THE OPTIMUM MODE CONSTRUCTION FOR CONDUCTING HEAT EXCHANGE PROCESS

Task statement variants of optimizing heat exchange process are proposed and the algorithm of their solution is given. Heat exchange device operation is submitted as multistage process for which criterion function is proposed. Managing influences are considered and the model of each step of process is given.

Keywords: heat exchange process, variable conditions, controlled variables, optimizing heat exchange process, minimal total expenses.

А.Г. ОГАНЕСЯН

ЭФФЕКТИВНЫЙ АЛГОРИТМ ВЫДЕЛЕНИЯ ФОРМАНТ ИЗ СПЕКТРА РЕЧЕВОГО СИГНАЛА

Разработан эффективный алгоритм выделения формант из спектра речевого сигнала в каналах тональной частоты. Используя особенности поведения формант, можно с большой точностью и оперативностью находить форманты речевого сигнала в каналах связи тональной частоты с полосой пропускания 300...3400 Гц. Алгоритм может быть использован в качестве инструмента в устройствах идентификации личности по голосу.

Ключевые слова: форманта, речевой сигнал, спектр, идентификация.

Введение. Одним из основных направлений в развитии речевых технологий в последние годы стала разработка методов выделения параметров речи из дискретизированных речевых сигналов как с целью передачи ее в цифровом виде в реальном масштабе времени, обеспечивающем высокую помехозащищенность и качество, так и с целью идентификации голоса. Если эту задачу применительно к передачам речевых сообщений в целом можно считать решенной аппаратно-программными средствами с применением вокодеров на базе цифровых сигнальных процессоров (ЦСП) [1], то поиск эффективных методов выделения параметров речевого сигнала сугубо программными средствами с целью оперативной идентификации и верификации голоса сохраняет актуальность [2]. При решении обеих задач в качестве основного инструмента используется спектральный анализатор, формирующий непрерывный спектр частот для каждого момента времени в координатах амплитуда – частота. Такое представление называется «моментальным спектром» или «частотным срезом» [3]. Важнейшим параметром спектра речевого сигнала является *форманта*, которую принято определять как концентрацию энергии в ограниченной частотной области. Форманта характеризуется частотой, шириной и амплитудой [4]. Такое определение форманты приводит к зависимости ее характеристик от ширины полосы анализатора, т.е. при сужении полосы количество формант может увеличиться, а при расширении – уменьшиться за счет объединения нескольких формант в одну. В реализации описываемого алгоритма использовались фонограммы с частотой дискретизации 8 кГц и быстрое преобразование Фурье (БПФ) размером 256, соответственно ширина полосы анализатора составляла 31,25 Гц.

Выделение формант сигналов, передаваемых по каналам связи тональной частоты (ТЧ), затруднено в силу специфики частотного среза этих сигналов, привносимой ограничением полосы частот. В настоящей статье описывается новый подход к решению указанной задачи применительно к сигналам с ограниченной полосой частот, отличающийся небольшими затратами времени и обеспечением приемлемой точности при выделении формант. Разработан

алгоритм, реализующий указанный подход, получена оценка сложности алгоритма и проведен эксперимент, подтверждающий правильность нахождения формант.

Подход к решению задачи. Для получения спектральной характеристики аналогового сигнала, представленного в дискретной форме, как правило, используют БПФ, результатом которого является представление сигнала в виде n частот

$$F = \{F_1, F_2, \dots, F_n\}.$$

Обозначим через F_{max} верхнюю границу частотного спектра, а через $F_d = 2F_{max}$ частоту дискретизации. Каждому компоненту $F_i \in F$ соответствует относительная амплитуда A_i . Компоненты $F_i \in F$ определяются по следующей формуле:

$$F_i = iF_d / n, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (1)$$

Отобразив результаты БПФ для данного момента времени, где ось абсцисс соответствует частоте, а ось ординат - амплитуде, можно получить графическое представление моментального спектра [3].

Огибающая линия моментального спектра, как правило, содержит большое число всплесков (пиков) отдельных частот, однако большая часть их, отличающихся небольшой амплитудой и отсутствием периодичности, неинформативна. Такие пики, как правило, находятся в области относительно высокочастотных составляющих спектра, лежащих выше 1500 Гц, и для речевой информации практически избыточны. Основную речевую информацию несут в себе пики с относительно большой амплитудой и очевидной периодичностью с периодом в диапазоне от 70 Гц до 900 Гц. Именно эти пики огибающей моментального спектра являются составляющими формантных линий, позволяющих производить идентификацию и верификацию голосовых сообщений. На рис 1 приведено трехмерное изображение нескольких моментальных спектров, полученных для последовательных моментов времени реальной речи. Линии, соединяющие соответственные пики моментальных спектров, образуют формантные линии.

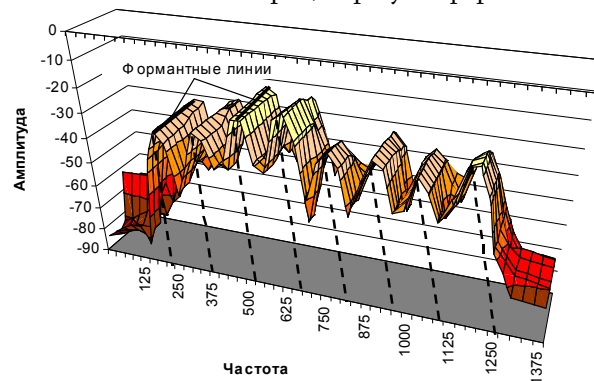


Рис 1. Образование формантных линий

Влияние шумовых источников на речевой сигнал может привести к образованию пиков моментального спектра, не являющихся частью речевого сигнала. Такие пики называются ложными.

Определим пик как максимум интенсивности энергии сигнала в определенном интервале d на оси частот и выразим функцию $P(F_k, d)$ проверки максимума в интервале d следующим образом:

$$P(F_k, d) = \begin{cases} 1, A_k > \max_{k-d \leq j \leq k+d} A_j, & k \neq j, \\ 0, A_k \leq \max_{k-d \leq j \leq k+d} A_j, & k \neq j. \end{cases} \quad (2)$$

Тогда нахождение всех пиков сведется к нахождению частот разложения $F_i \in F$, для которых выполняется условие $P(F_i, d) = 1$. Назовем данный способ нахождения пиков последовательным проходом.

Очевидно, что процесс выделения формант предполагает нахождение из всего множества пиков спектрального среза только тех, которые подходят по определению к формантам, для чего необходимо более многостороннее рассмотрение «поведения» [4] формант, характерных для речевого сигнала.

Одной из особенностей речевого сигнала является кратность частот формант в случае узкополосного анализатора [3], т.е. частота следующей форманты больше частоты предыдущей на величину, равную частоте первой форманты:

$$\hat{F}_k = k\hat{F}_1, \quad \hat{F}_1 - \text{частота первой форманты.} \quad (3)^{\perp}$$

Данная особенность дает возможность практически исключить нахождение ложных формант и существенно сократить количество выполняемых операций, т.к. после нахождения $\hat{F}_1$ можно лишь проверять наличие пика в точках ожидания, вычисленных по формуле (3)

.Еще одна особенность речевого сигнала заключается в том, что первая форманта в основном лежит в диапазоне от 70 Гц до 300 Гц [4]. Сочетание этих особенностей с учетом отношения амплитуд истинных формант к остальным пикам позволяет практически исключить ложные пик

Для применения формулы (3) необходимо знать частоту первой форманты, для нахождения которой можно воспользоваться способом определения пика (2). После нахождения первой форманты остальные необходимо искать в точках "ожидания" согласно формуле (3), с дальнейшей проверкой условия (2). В идеале, правильно найдя частоту первой форманты, можно найти все форманты на частотном срезе. Хотя на практике кратность частот формант не всегда выполняется точно, в особенности для высоких частот, этот подход довольно эффективен и дает хорошие результаты для широкополосного сигнала, не имеющего существенного подавления частотных составляющих выше 70 Гц.

Попытка применения приведенного способа выделения формант к речевым сигналам, передаваемым по наиболее распространенным каналам тональной частоты (ТЧ), встречается с проблемой безошибочного нахождения первой форманты. Действительно, стандарт на каналы ТЧ, с целью подавления

шумов, вводит ограничение на полосу пропускания путем фильтрации сигнала полосовыми фильтрами, подавляющими частоты ниже 300 Гц и выше 3400 Гц. С другой стороны, во многих случаях первая форманта человеческой речи, в особенности для мужского голоса, лежит ниже 300 Гц, что существенно усложняет нахождение первой форманты.

Рассмотрим два случая, при которых невозможно непосредственное нахождение первой форманты сигнала, передаваемого по каналам ТЧ.

Первый случай, когда в результате фильтрации полностью теряется первый пик. На рис 2 приведены моментальные спектры одного и того же сигнала 1 - без фильтрации (сверху) и 2 - с подавлением частотных составляющих ниже 300 Гц (снизу).

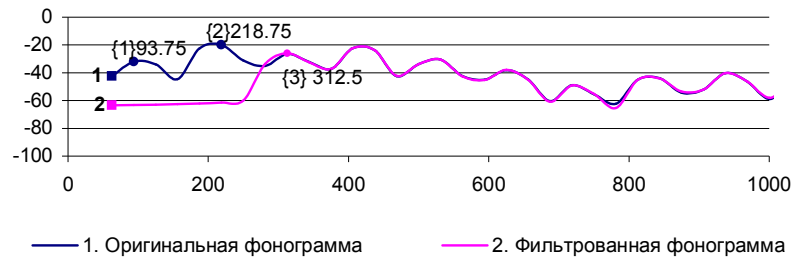


Рис 2. Потеря первого пика при фильтрации

Как видно из рис 2, первые две форманты после фильтрации полностью «исчезли», следовательно, применение способа (2) приведет к смещению индексов формант, а именно, за первую будет принята третья форманта.

Во втором случае (рис 3) в результате фильтрации от первой форманты {1} с большой интенсивностью остается смещенный по частоте "след" форманты {2}, который может быть принят за первую форманту.

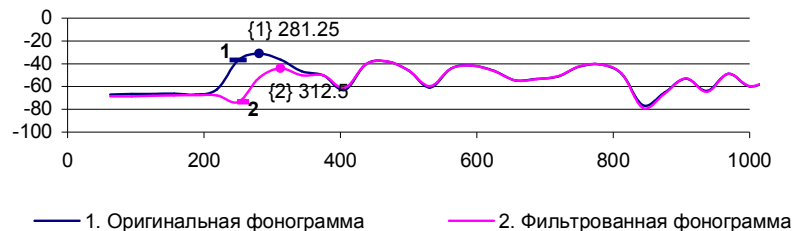


Рис 3. Смещение пика при фильтрации

Очевидно, что потеря первой форманты делает невозможным использование формулы (3), а сдвиг первой форманты приведет к нарушению их кратности. Следовательно, даже в случае правильного нахождения второго пика будет получен неверный коэффициент кратности и, как следствие, будут вычислены неверные частоты ожидания следующих формант.

В обоих случаях можно избежать ошибок, если коэффициент кратности определять по правильно найденным соседним пикам, лежащим выше $(300+300/2) \text{ Гц} = 450 \text{ Гц}$, где 300 Гц – граничная частота полосового фильтра.

Пусть $\tilde{F} = \{F_{i_1}, F_{i_2}, \dots, F_{i_m}\}$ является множеством пиков моментального спектра, удовлетворяющих условию (2).

Определение 1. Назовем расстоянием между двумя пиками количество элементарных частотных полос БПФ между ними:

$$d_{i_j i_k} = \frac{|F_{i_j} - F_{i_k}|}{s}, \text{ где } s = \frac{F_d}{n} \text{ (величина элементарной частотной полосы БПФ)}.$$

$$\text{Используя (1), получим } d_{i_j i_k} = \frac{\left| i_j \frac{F_d}{n} - i_k \frac{F_d}{n} \right|}{\frac{F_d}{n}} = |i_j - i_k| = i_k - i_j, \text{ при } j < k.$$

Предположим, что для пары (i_j, i_k) имеет место $i_k > i_j$.

Очевидно, что при интервале проверки пика, равном d , согласно (2), $d < d_{i_j i_k} < n$.

Определим граф $G_\Delta(V, E_\Delta)[5]$ для множества пиков $\tilde{F} = \{F_{i_1}, F_{i_2}, \dots, F_{i_m}\}$ следующим образом:

$$V = \{i_1, i_2, \dots, i_m\},$$

$$E_\Delta = \{(i_j, i_k) \mid d_{i_j i_k} = \Delta\} \text{ где } \Delta = 1, 2, \dots, m.$$

Для фиксированного (вершины ребер $(i_j, i_k) \in E_\Delta$ можно представить в виде $i_j = \Delta \cdot q + r$, т.е. $r \equiv i_j \pmod{\Delta}$, где $r = 0, 1, \dots, \Delta - 1$.

Тем самым, остаток $r = 0, 1, \dots, \Delta - 1$ разбивает множество ребер E_Δ на непересекающиеся классы $E_{\Delta(r)}$. Назовем их однородными классами.

Можно легко доказать, что однородные классы $E_{\Delta(r)}$ состоят из компонентов связности, являющихся простыми цепями. Используя данное утверждение, можно разработать линейный алгоритм выделения цепей в $E_{\Delta(r)}$.

$$\text{Определение 2. Назовем } W_T = \frac{1}{|V_T|} \sum_{i_j \in T} A_{i_j} \text{ весом цепи } T.$$

Определение 3. Назовем *формантной цепью* цепь с наименьшим индексом первой вершины, состоящую из более чем двух вершин и имеющую максимальный вес.

Описание шагов алгоритма нахождения формант А

А1. Выделить все пики спектрального среза (2) . Обозначить множество найденных пиков спектрального среза $\tilde{F} = \{F_{i_1}, F_{i_2}, \dots, F_{i_m}\}$, где $i_1 < i_2 < \dots < i_{m-1} < i_m$ и $m \ll n$.

А2. Построить граф $G_\Delta(V, E_\Delta)$ [5] для полученного множества $\tilde{F}$.

А3. Выделить цепи из множеств $E_{\Delta(r)}$.

А4. Выбрать *формантную цепь*.

Оценка алгоритма. Для оценки сложности алгоритма в целом оценим сложность отдельных частей алгоритма. Критерием оценки является зависимость количества элементарных операций от количества частот разбиения БПФ n .

Оценим сложность алгоритма по шагам:

$$\wp(A1) = O(n),$$

$$\wp(A2) = O(n^2),$$

$$\wp(A3) = O\left(\sum_{\Delta=\Delta_{min}}^{\Delta_{max}} |E_\Delta|\right) = O(m^2) \leq O(n^2),$$

$$\wp(A4) = O(n^2).$$

Таким образом, сложность разработанного алгоритма не превышает

$$\wp(A) = \wp(A1) + \wp(A2) + \wp(A3) + \wp(A4) = O(n^2).$$

Для проверки эффективности алгоритма был проведен эксперимент с участием 5 специально выбранных дикторов, имеющих разные тембры голоса. В качестве тестовой фонограммы использовалась запись, содержащая всевозможные вокализованные звуки. Результаты эксперимента показали, что вне зависимости от диктора процент правильного нахождения частот первых четырех формант составил в среднем 95%.

Выводы. Как уже отмечалось, в результате прохождения по каналам тональной частоты спектр речевого сигнала терпит существенные изменения. Искажение наиболее важной низкочастотной части спектра приводит к смещению или потере первых пиков частотного среза, тем самым затрудняя использование алгоритмов выделения формант, использующих лишь принцип их кратности. Предложенный алгоритм, объединяющий способ последовательного прохода с проверкой подлинности найденных пиков на кратность их частот, с последующим выделением цепочек с наибольшей усредненной амплитудой, позволяет с большой точностью и малыми затратами времени находить форманты частотного среза. Последнее обстоятельство позволяет применять данный алгоритм при оперативной идентификации голосовых сообщений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Schroeder M.R.** Computer Speech: Recognition, Compression, Synthesis. <http://datacompression.info/index.shtml>
2. **Сердюков В.Д.** Опознавание речевых сигналов на фоне мешающих факторов.- Тбилиси: Наука, 1987. -142 с.
3. **Фланаган Дж.Л.** Анализ, синтез и восприятие речи. –М.: Связь, 1968. -396 с.
4. **Рабинер Л.Р., Шафер Р.В.** Цифровая обработка речевых сигналов. –М.: Радио и связь, 1981. - 496 с.
5. **Харари Ф.** Теория графов. – М.: Мир, 1973. -300 с.

Ереванский НИИ математических машин. Материал поступил в редакцию 10.02.2005.

Ա. Գ. ՀՈՎՀԱՆՆԻՍՅԱՆ

ՉԱՅՆԱՅԻՆ ԱԶԴԱՆՇԱՆԻ ՏԱՐՐԱԿԱՏԿԵՐԻՑ ՖՈՐՄԱՆՏԵՐԻ ԱՌԱՆՁՆԱՑՄԱՆ ԱՐԴՅՈՒՆԱՎԵՏ ԱԼԳՈՐԻԹՄ

Ներկայացված ալգորիթմն առանձնացնում է ձայնային ազդանշանի ֆորմանտները: Օգտագործելով տարրապատկերային վերլուծության միջոցները և ձայնային ազդանշանի ֆորմանտների հատկությունները՝ ալգորիթմն ապահովում է տոնային հաճախականության կապուղիներով փոխանցված ազդանշանի ֆորմանտների առանձնացման բարձր ճշգրտություն և արագություն: Ալգորիթմը կարող է օգտագործվել որպես գործիք՝ խոսողի նույնականացման համակարգերում:

Առանցքային բառեր. ֆորմանտ, ձայնային ազդանշան, տարրապատկեր, նույնականացում:

A.G. HOVHANNISYAN

EFFECTIVE VOICE SIGNAL FORMANT RECOGNITION ALGORITHM

The algorithm presented recognizes formants of voice signal. It uses spectrum analysis techniques and formant behavior characteristics to get high speed and reliability of recognition process. Voice signals in tone frequency channels in 300...3400 Hz range are given. The algorithm can be used as a tool in speaker authentication systems.

Keywords: formant, voice signal, spectrum, identification.

V.Sh. MELIQYAN, D.F. DAVTYAN, K.A. FANYAN

SIMULATION METHODOLOGY BASED ON CONDITIONAL EXTRACTION AND SHORTEST PATH REPRESENTATION FOR ELECTROSTATIC DISCHARGE (ESD) ANALYSIS IN CMOS TECHNOLOGIES

Electrostatic discharge (ESD) is one of the reliability problems of today's IC. In addition, there is no such a tool, which will help to design ICs reliable against ESD. The problem is that ESD protection devices have always complex configuration, such as SCR ggMOS, etc., because of their working range, which is not well investigated and measured. Moreover, the other problem is the simulations complexity in the simulator machines from horse power point of view. The represented methodology allows designers to make their IC first spin reliable.

Keywords: ESD, conditional extraction, shortest path, network flow.

1. Introduction. ESD protection devices are usually located inside the I/O circuit, which is connected to the pad and is the place, where external hazards are coming in, such as high currents caused by electrostatic discharges [1]. Moreover, during those events, the usual circuit representation given by the designer and/or commercial extractor tools is not enough. The limitation of commercial extractor tools is as follows:

- They perform device extraction based on Boolean operations of layout masks. The tools cannot extract parasitic devices such as field devices, SCRs or parasitic BJTs, which are often unintended side effect of the layout and not recognized by designers. However, they can play an important role during ESD stress events.
- They only extract circuit schematics under normal operating condition, i.e. when the chip is powered up. However, the circuit is not powered up during ESD events. An ESD event can generate stress current in excess of 1 A. The normal device models are not applicable, because devices are operating in high current regimes or biased differently from normal operating modes. Therefore, the schematic for circuit simulation must be determined according to the ESD conditions.

Therefore, an extraction tool, which would extract all parasitic devices aroused during ESD events that outlined in the first section of this paper, is necessary. However, extracting all those devices is not solving the whole problem. There is also a simulation part, which is also a challenge, since the simulation of the whole chip in device level (and this should be done, according to the ESD standard requirements) is something unreachable, so another approach is necessary to solve this problem too. The methodology for CMOS I/Os is proposed in Fig. 1. As depicted in the picture, the technological information (design rules, dielectric constants, diffusion thickness, etc), modeled ESD events and the layout in GDSII format are the inputs for further analyses.

In the conditional extraction part, the first is normal operating condition extraction process, by using a generic device extraction approach, and then in stress annotation part a specified ESD stress condition is given, the device bias conditions are identified

and the circuit schematic is extracted. The ESD stress condition is defined by specifying an I/O pad zapped positively or negatively with respect to another pad.

In BJT extraction part, parasitic BJTs are extracted and detected.

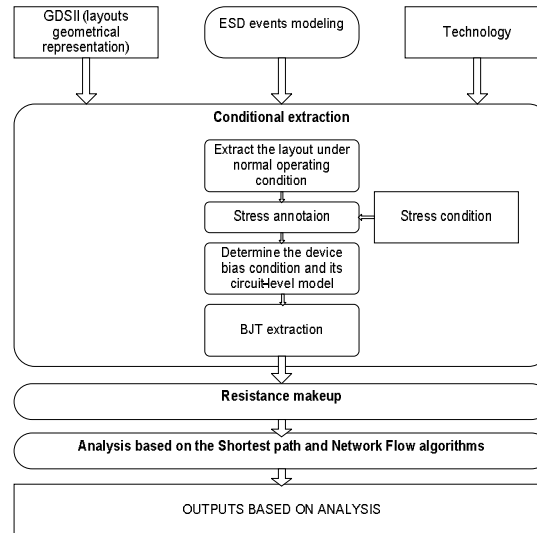


Fig.1. Simulation methodology's flow algorithm

Then comes the analysis based on the shortest paths and network flow algorithms.

2. Conditional Extraction. This part is intended for layout representation in the form, which is providing more process, happening during ESD events. During this event, chips usually are not powered up, the ESD zapping should be done for all possible pin combination of a chip for both positive and negative stresses, and the chip should pass 2 KV and more HBM-ESD level for all stresses. When the ESD zapping is performed between two pads, all other pads are kept floating.

Since the behavior of a device is bias-dependent, its circuit model should be determined according to its operating condition. The proposed static analysis technique, called *stress annotation*, determines each device's applicable circuit model.

In Figure 2 the depicted stress annotation is performed for the I/O circuit in a specified stress condition, i.e. positive stress on the pad with respect to Vss pad. First, the circuit schematic for the pad is extracted (Figure 1). Then stress annotation is conducted using the stressed current from stressed pad. The stressed current passes through forward biased p-n junctions and semiconductor resistors. The search is stopped when a reversed biased p-n junction is reached. Each interconnected net in the current path is annotated with stress strength. The relative voltage levels can be compared by checking their stress strength; also, these stress annotations help to make BJTs identifications. Starting with an initial value as 10 the stress strength will be reduced by one every time when the stress current passes through the resistor.

After the biased condition is determined from the stress annotation, each device's circuit model can be determined. When a device is under ESD current stress a high current model must be used, such as the NMOS model, which will cover the snapback regime range, and a resistor model, which can cover velocity saturation effect. When the p-n junction in a transistor is forward-biased under ESD stress it operates as a diode. When the junction formed between the drain diffusion of the driver PMOS transistor and the n-well is forward biased, the n-well is charged up and the high current is propagated to the Vdd power line via the well contact. For this case, we substitute the PMOS transistor with the serial combination of forward-biased diode and a well resistor. This is the applicable circuit model for the PMOS transistor under this specific bias condition.

Fig.2. Stress annotation to identify devices bias condition and determiing its circuit model

3. Analysis based on the Shortest Path and network flow algorithms. After graphical representation of the electrical network, done especially for ESD events and abstracted using resistor's makeup system (Figure 3), the analysis on the network should give output results as an input for designers to make their discussions on how to change their design as to satisfy all reliability requirements. As a help for this item, the Network Flow algorithms called Convex Minimum Cost Maximum Flow is used.

The representation of Convex Minimum Cost Maximum Flow (CMCMF) optimization problem from the ESD event point of view. Usually the CMCMF optimization problem is as follows:

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \rightarrow \min, \\ \sum_{j:(i,j) \in A} x_{ij} - \sum_{j:(i,j) \in A} x_{ji} = b(i), \forall i \in N, \\ 0 \leq x_{ij} \leq u_{ij}, \forall (i,j) \in A, \end{cases}$$

$$\sum_{\forall i \in N} b(i) = 0.$$

The notations N (graphs vertex vectors) and A (adjacency graph) are representation of graph, as $G = (N, A)$ [3]. By approximating these assumptions for our electrical network, it should be accounted that the arcs in our network represent resistors, diodes, etc., which carry the current. Moreover, what should be found is: How much current is flowing on each resistor (arc) in the network? Once the amount of current, flowing on each component of the electrical network, is found, it is a simple matter to apply Ohm's law to each component along any single path, and to sum voltage drop contributions. So, according to Ohm's law the representation of CMCMF from ESD point of view shows that a resistor with resistance r dissipates rI^2 watts of power, where I is the amount of current flowing along the resistor. Therefore, the equilibrium current will be found on each arc in our network under this cost model. That is for each arc $(i, j) \in A(G)$, which collectively depicts our network graphically, the equilibrium current $x(i, j)$ will be found, where the cost of augmenting current along the arc (i, j) varies (convexly) as the square of the amount of flow along that arc, multiplies its resistive component c_{ij} . Keeping this in mind, we rewrite the CMCMF as

$$\sum_{j=1}^n C(x_{ij}) \rightarrow \min ,$$

$$\begin{cases} \sum_{j:(i,j) \in A} x_{ij} - \sum_{j:(i,j) \in A} x_{ji} = b(i) \forall i \in N, \\ 0 \leq x_{ij} \leq u_{ij} \forall (i, j) \in A, \end{cases}$$

and our convex cost C will be $C(x_{ij}) = c_{ij} * x_{ij}^2$.

With these assumptions it is possible to compute the optimal (equilibrium) current on each arc, after which it is possible to compute the voltage drop on the shortest path (minimal resistance path) between the source and sink, by using Dijkstra's *Single Source Shortest Path* (SSSP) algorithm. The basic idea of SSSP is that a path $P = \langle s = a_1 \dots a_k = t \rangle$ between s and t is the *shortest path*, only if for any other path $P' = \langle s = a'_1 \dots a'_j = t \rangle$, thus:

$$\sum_{i=1}^{k-1} c(a_i, a_{i+1}) \leq \sum_{i=1}^{j-1} c(a'_i, a'_{i+1}).$$

According to the electrical analysis, we can say that this algorithm allows to find the path with the possible minimum resistance between source and sink. And if the shortest path $P = \langle s = v_1, v_2, \dots, v_k = t \rangle$, the voltage drop will be:

$$V = \sum_{i=2}^n c(v_{i-1}, v_i) \cdot x^*(v_{i-1}, v_i) , \text{ where } x^* \text{ is the equilibrium current.}$$

This result is the main desired result which means there must be further analysis.

4. Conclusion. Thus, by having the amount of current flown through each arc, which is possible to get by using the CMCMF algorithm, and the path with minimal resistance, found by Dijkstra's SSSP algorithm, it is a simple matter to compute the excitation level between two pad pairs, and the needed information for designers' further analysis.

REFERENCES

1. **Mouradian V., Davtyan D.** Whole chip ESD protection in sub-quarter-micron CMOS Mixed signal ICs // Proceeding of the 4th national Semiconductor Microelectronics Conference. - May 29-31, 2003. - P. 244-247.
2. **Tong Li , Sung-Mo Kang.** Layout Extraction and Verification Methodology for CMOS I/O Circuits // 35th Design Automation Conference. - San Francisco, CA USA, 1998.
3. **Ahuja Raviandra K., Magnanti Thomas L., Orlin James B.** Network Flows:Theory, Algorithms, and Applications. Addison Wesley, 1993.

SEUA. The material is received 12.01.2005.

Վ.Շ. ՄԵԼԻՔՅԱՆ, Դ.Ֆ. ԴԱՎԹՅԱՆ, Կ.Ա. ՖԱՆՅԱՆ

ՎԻՃԱԿԱՅԻՆ ՔԱՂՎԱԾՔԻ ԵՎ ԿԱՐՃԱԳՈՒՑՆ ԶԱՆԱՊԱՐԶԻ ՆԵՐԿԱՅԱՑՄԱՆ ՎՐԱ ՀԻՄՆՎԱԾ ՍՈՂԵԼԱՎՈՐՄԱՆ ՄԵԹՈԴԱԲԱՆՈՒԹՅՈՒՆ ԿՄՕԿ ՏԵԽՆՈԼՈԳԻԱՆԵՐՈՒՄ ԷԼԵԿՏՐԱՍՏԱՏԻԿ ԼԻՑԲԱԾԱԾՄԱՆ (ԷՍԼ) ՀԵՏԱԶՈՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՀԱՄԱՐ

Էլեկտրաստատիկ լիցքաթափումը (ԷՍԼ) այսօրվա ինտեգրալ սխեմաների (ԻՍ) ապահովության հիմնահարցերից է: Չնայած այդ փաստին՝ չկա այնպիսի ավտոմատացված գործիք, որը կօգներ նախագծել ԷՍԼ-ից պաշտպանված ԻՍ-եր: Խնդիրն այն է, որ ԷՍԼ պաշտպանական սարքերն (հարթակը դեկավարող ուղղիչները, փականով հողանցված ՄՕԿ-երը) ունեն բարդ կառուցվածք՝ աշխատանքային միջակայքերի պատճառով: Բացի դրանից, գոյություն ունի նաև մոդելավորման բարդություն՝ մոդելավորման ընթացքում օգտագործվող մեքենաների մեքենայական ժամանակի և հզորության օգտագործման տեսակետից: Ներկայացված մեթոդաբանությունը թույլ է տալիս նախագծել ԷՍԼ-ից պաշտպանված ԻՍ:

Առանցքային բաներ. ԷՍԼ, վիճակային քաղվածք, կարճագույն ճանապարհ, ցանցի հոսք:

В.Ш. МЕЛИКЯН, Д.Ф. ДАВТЯН, К.А. ФАНЯН

МЕТОДОЛОГИЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЙ РАЗГРУЗКИ В КМОП ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ОБУСЛОВЛЕННОГО ИЗВЛЕЧЕНИЯ И ПРЕДСТАВЛЕНИИ ЭСР КРАТЧАЙШИМ ПУТЕМ

Электростатическая разгрузка (ЭСР) является одной из проблем надежности современных интегральных схем (ИС). Несмотря на это, до сих пор не было создано ни одного инструмента, который помог бы проектировать ИС надежными в отношении ЭСР. Проблема состоит в том, что устройства, которые помогают защищать ИС от ЭСР, такие как выпрямитель, управляемый подложкой, МОП с заземленным затвором, имеют сложную структуру. При этом существует сложность моделирования с точки зрения машинного времени и мощности. Представленная методология позволяет проектировать ИС, защищенные от ЭСР.

Ключевые слова: ЭСР, обусловленное извлечение, кратчайший путь, поток сети.

С.Р. АРУТЮНЯН, В.Е. КАРАПЕТЯН, Г.Р. БАДАЛЯН, А.С. КУЗАНЯН

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ЛАЗЕРНОГО НАПЫЛЕНИЯ ПЛЕНОК YBCO НА ПОДЛОЖКИ LiNbO₃

С целью получения многослойных структур YBCO/LiNbO₃, для изготовления ПАВ фильтров со сверхпроводящими контактами, исследован процесс взаимодействия пленок YBCO с LiNbO₃ подложкой. Для лазерного напыления пленок YBCO использовались мишени состава $Y_1Ba_2Cu_nO_y$ ($n=3...5$). Данные рентгенофазового анализа и электронной микроскопии показывают, что при температурах выше 600°C, необходимых для формирования структуры YBCO при лазерном напылении, происходит взаимодействие пленки с подложкой. Исследование оптических спектров подложек LiNbO₃, очищенных от пленок, свидетельствует о диффузии атомов Cu из пленки в подложку. Предложены другие пути получения многослойных структур YBCO/LiNbO₃ для изготовления ПАВ фильтров.

Ключевые слова: сверхпроводящие контакты, многослойные структуры, ПАВ фильтры.

1. Введение. Устройства на поверхностных акустических волнах (ПАВ) активно разрабатываются уже более 30 лет. Это широкий класс устройств, включающий линии задержки, полосовые фильтры промежуточных частот, резонаторы и резонаторные фильтры, согласованные фильтры, фильтры сжатия импульсов и т.д. Особенности ПАВ устройств являются: малая скорость и затухание поверхностных волн, интегральность исполнения, доступность тракта ПАВ, позволяющая эффективно управлять характеристиками с помощью внешних воздействий [1]. В устройствах на ПАВ, использующих пьезоэлектрические подложки, для возбуждения и приема акустических волн чаще всего применяется встречно-штыревой или электродный преобразователь (ВШП). Эффективность ПАВ преобразователей обратно пропорциональна сопротивлению ВШП, следовательно, сверхпроводящие электроды должны значительно повысить этот параметр.

2. Методика эксперимента. В качестве источника лазерного излучения был использован YAG:Nd³⁺ лазер с модулированной добротностью (пассивный затвор LiF), длиной волны 1,06 мкм, энергией и длительностью импульса 0,1 Дж и 20 нс соответственно. Частота следования импульсов составляла 15 Гц.

Пленки напылялись на подложки LiNbO₃ YZ среза размерами 8-12 мм² из мишеней состава $Y_1Ba_2Cu_nO_y$ ($n=3...5$). Скорость вращения мишени составляла 37 об/мин. Расстояние между мишенью и подложкой было 40 мм. Давление в камере при напылении поддерживалось на уровне 0,2 Тор.

Полученные пленки исследовались методами рентгеновской дифракции (ДРОН-4) и электронной микроскопии (BS-301 Tesla), а взаимодействие напыленных пленок и подложки LiNbO₃ - методом оптической спектроскопии (Specord M40).

3. Результаты и обсуждение. Купратные сверхпроводники, в частности $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-6}$ (YBCO), подходят для решения задачи создания ПАВ фильтров со сверхпроводящими контактами, так как обладают высокой критической температурой сверхпроводящего перехода, кристаллографическими и химическими свойствами, схожими со свойствами пьезоэлектрических подложек, например $LiNbO_3$, используемых в ПАВ устройствах. Они также позволяют управлять параметрами устройства, изменяя свое сопротивление под воздействием тока и/или магнитного поля. Именно поэтому, практически с момента открытия явления высокотемпературной сверхпроводимости, проводились исследования возможности изготовления ПАВ фильтров с ВТСП контактами [2-5]. В частности, в [3] показано резкое возрастание фактора эффективности η при температурах ниже сверхпроводящего перехода ВШП. Фактор эффективности возбуждения акустических волн определяется как

$$\eta = 10 \log[P_a / (P_a + P_c)], \quad (1)$$

где P_a – мощность, излучаемая акустически; P_c – мощность, теряемая из-за потерь в ВШП, которая задается выражением

$$P_c \sim [(\Delta f \cdot T)(4\pi\rho C_s V_p)/k^2 + 1]^2, \quad (2)$$

Δf – полоса пропускания; T – время прохождения акустической волны; ρ – сопротивление ВШП; C_s – межэлектродная емкость на единицу длины; V_p – скорость звука; k – коэффициент электромеханической связи.

Очевидно, что, при прочих равных условиях, чем меньше будет ρ , тем больше будет значение η . В [3] изменение η при температуре сверхпроводящего перехода ВШП составило 12 дБ для линии задержки с центральной частотой 50 МГц. Однако в современных средствах связи используются более высокие частоты ($\sim$ ГГц). Для этих частот нужны ВШП со значительно меньшими характерными размерами, следовательно, YBCO пленки с более совершенной морфологией поверхности. Определим факторы, влияющие на морфологию и сверхпроводящие свойства YBCO пленок на $LiNbO_3$ подложках.

Пленки YBCO напылялись на подложки $LiNbO_3$ при температуре 600 °С, затем подвергались дополнительной термообработке на воздухе при температурах 600...850 °С продолжительностью до 60 мин. На рис.1 приведена рентгеновская дифрактограмма пленки YBCO толщиной 400 нм, подвергнутой термообработке при 750 °С в течение 20 мин. Из рисунка видно, что пленка – текстурированная, с осью с, перпендикулярной плоскости подложки. Этим она схожа с пленками YBCO, напыленными на обычно используемые подложки $SrTiO_3$, MgO или YSZ. Однако данные электронной микроскопии свидетельствуют, что пленки на $LiNbO_3$ не эпитаксиальные, не монокристаллические, а состоят из маленьких кристаллитов, ориентированных в одном и том же направлении. Обусловленная этим неоднородность поверхности пленки возрастает с увеличением температуры термообработки. Одновременно с увеличением температуры и времени термообработки увеличивается удельное сопротивление пленок при комнатной температуре, а температурная зависимость сопротивления меняет свой характер с металлического на полупроводниковый.

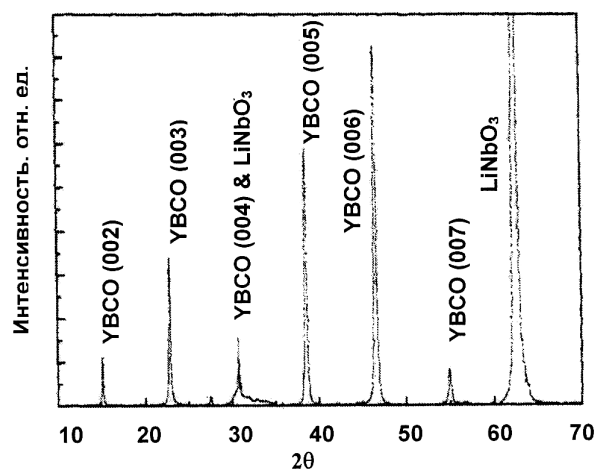


Рис. 1. Рентгеновская дифрактограмма YBCO пленки толщиной 400 нм, напыленной на подложку LiNbO₃ YZ-среза

Эти данные свидетельствуют о взаимодействии YBCO пленки с подложкой LiNbO₃. Для выяснения характера этого взаимодействия были исследованы спектры оптического поглощения подложек, с которых слабым раствором HNO₃ были смыты пленки YBCO (рис. 2).

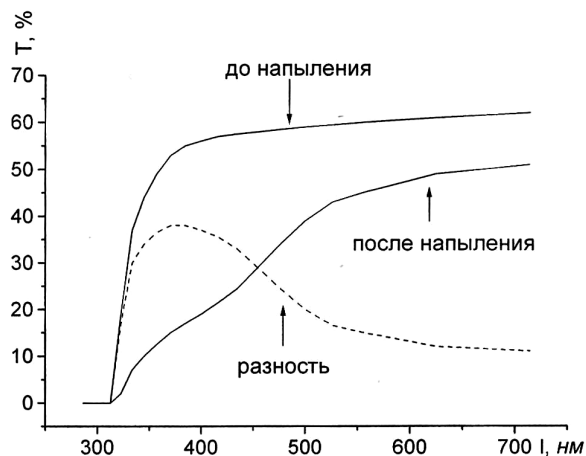


Рис. 2. Оптические спектры подложки LiNbO₃ толщиной 1 мм до и после напыления пленки YBCO

Как видно из рисунка, в спектре подложки, на которую было проведено напыление YBCO, появляется полоса поглощения с максимумом на 380 нм, свойственная кристаллам LiNbO₃ с примесью ионов Cu [6]. Данное обстоятельство позволяет утверждать, что при температурах выше 700 °C

происходит ощутимая диффузия Cu из пленки в подложку. Одновременно, по данным электронной микроскопии, на поверхности подложки образуются частички субмикронных размеров, что делает шероховатой границу раздела и понижает сверхпроводящие характеристики пленки. Вышеперечисленные факты ограничивают возможность использования гетероструктур YBCO/LiNbO₃ в ПАВ устройствах.

Одним из возможных путей решения задачи получения эпитаксиальных пленок YBCO на подложках LiNbO₃ является напыление буферного слоя [7]. Однако буферные слои толщиной ~ 100 нм значительно увеличат потери в ПАВ устройствах, сведя на нет выигрыш от применения сверхпроводящих ВШП. Нами предлагаются два варианта реализации ПАВ устройств со сверхпроводящими ВШП. Первой возможностью решения задачи является изготовление сверхпроводящих ВШП на обычных для YBCO подложках с последующим нанесением сверху пленки LiNbO₃ золь-гель методом при значительно более низких температурах (~ 400°C), при которых не будет происходить взаимодействие пленок YBCO и LiNbO₃. Конфигурация предлагаемого ПАВ устройства приведена на рис.3.

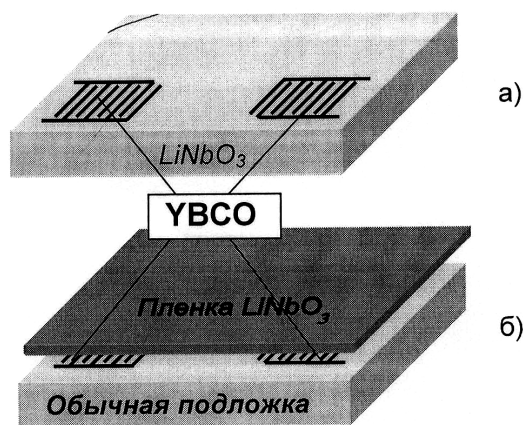


Рис.3. Конфигурация обычных (а) и предлагаемых (б) ПАВ фильтров со сверхпроводящими ВШП

Возможность использования эпитаксиальных пленок LiNbO₃ в ПАВ устройствах продемонстрирована в [8]. Второй возможностью изготовления гетероструктур YBCO/пьезоэлектрик является использование иных, чем LiNbO₃, пьезоэлектрических материалов, в частности, обладающих более высоким, чем кварц, коэффициентом электромеханической связи. Наиболее перспективными, на наш взгляд, являются берлинит (AlPO₄), лангасит (La₃Ga₅SiO₁₄), ланганит (La₃Ga_{5.5}Nb_{0.5}O₁₄) и фосфат галлия (GaPO₄).

Работа поддержана Министерством образования и науки Армении и грантом NATO Sfp No.974082.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Красильников В.А., Крылов В.В. Введение в физическую акустику. – М.: Наука, 1984.- 305с.
2. Жгун С.А., Львов М.Н. Сверхпроводимость: физика, химия техника. – 1991.-Т.4, №4.-С.825.
3. Fredriksen H., Ritums D., Wu N.J., Li X.Y., et al. Appl. Phys. Letters. – 1994.-V.64, №22.-P.3033.
4. Wu N.J., Li X.Y., Li J., Lin H., Fredriksen H. et al. J. Mater. Res. – 1995.-V.10, №12.-P.3009.
5. Gong Z.H., Ronnekleiv A., Grepstad J.K. Physica C. – 1997.-V.282-287, Pt.4. - P.2521.
6. Kurz H., Kratzig E., Keune W., Engelman H. et al. Appl. Phys. – 1977.-12.-P.355.
7. Hashiguchi S., Min E., Sakuta K., Kobayashi T. Jpn. J. Appl. Phys. – 1992.-31.-P.780.
8. Shibata Y., Kaya K., Akashi K. Appl. Phys. Lett. – 1992.-V.61, №8.-P.1000.

Ин-т физ. исслед. НАН РА. Материал поступил в редакцию 12.03.2003

Ս.Ռ. ՀԱՐՈՒԹՅՈՒՆՅԱՆ, Վ.Ե. ԿԱՐԱՊԵՏՅԱՆ, Գ.Ր. ԲԱԴԱԼՅԱՆ, Ա.Ս. ԿՈՒԶԱՆՅԱՆ

LiNbO₃ ՏԱԿԴԻՐԻ ՎՐԱ YBCO ԲԱՐԱԿ ԹԱՂԱՆԹՆԵՐԻ ԼԱԶԵՐԱՅԻՆ ՓՈՇԵՆՍԵՑՄԱՆ ՈՐՈՇ ԱՌԱՋՆԱՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐ

Գերհաղորդիչ հպակներով ՄԱԱ ֆիլտրերի պատրաստման համար YBCO/LiNbO₃ բազմաշերտ կառուցվածքներ ստանալու նպատակով ուսումնասիրվել է YBCO թաղանթների և LiNbO₃ տակդիրների փոխազդեցության գործընթացը: YBCO թաղանթների լազերային փոշենստեցման համար կիրառվել են Y₁Ba₂Cu_nO_y (n=3...5) բաղադրության թիրախներ: Ռենտգենաֆազային անալիզի և էլեկտրոնային միկրոսկոպիայի տվյալները ցույց են տալիս, որ 600 °C- ից բարձր ջերմաստիճաններում, որն անհրաժեշտ է լազերային փոշենստեցման ժամանակ YBCO կառուցվածքի ձևավորման համար, տեղի է ունենում թաղանթի և տակդիրի փոխազդեցություն: Թաղանթներից մաքրված LiNbO₃ տակդիրների օպտիկական սպեկտրների ուսումնասիրումը ցույց է տալիս, որ տեղի է ունենում պղնձի ատոմների դիֆուզիա՝ թաղանթից դեպի տակդիր: ՄԱԱ ֆիլտրերի պատրաստման համար առաջարկում են YBCO/LiNbO₃ բազմաշերտ կառուցվածքների ստացման այլ ուղիներ:

Առանցքային բառեր. գերհաղորդիչ հպակներ, բազմաշերտ կառուցվածքներ, ՄԱԱ ֆիլտրեր:

S.R. HARUTYUNYAN, V.E. KARAPETYAN, G.R. BADALYAN, A.S. KUZANYAN

SOME FEATURES OF LASER DEPOSITION OF YBCO FILMS ON LiNbO₃ SUBSTRATES

To study multilayer YBCO/LiNbO₃ structures for constructing filters with conductive contacts, the process of YBCO film interaction with LiNbO₃ substrates is investigated. The targets with Y₁Ba₂Cu_nO_y (n=3...5) composition are used for laser deposition of YBCO films. The data of the X-ray analysis of microscopy show that at the temperatures higher than 600 °C necessary for forming YBCO structures an interaction of the film with the substrate occurs during laser deposition. The investigation of optical spectra of LiNbO₃ substrates cleaned from films shows the diffusion of Cu atoms from films into the substrate. Other ways for obtaining multilayer YBCO/LiNbO₃ structures for producing SAW filters are proposed.

Keywords: superconducting contacts, multilayer structures, surface acoustic wave filters.

В.Г. АВЕТИСЯН

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТАЛЛОДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВОЛНОВОДОВ В АНТЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЯХ ДИАПАЗОНА КОРОТКИХ МИЛЛИМЕТРОВЫХ ВОЛН

Рассматриваются вопросы применения полых металлодиэлектрических сверхразмерных волноводов и элементов на их основе в линии передачи сигнала диапазона коротких миллиметровых волн (КММВ) и входных узлах аппаратуры при измерениях амплитудно – фазового распределения ближнего поля антенн диапазона КММВ.

Ключевые слова: антенные измерения, ближнее поле, металлодиэлектрические волноводы, квазиоптическое приближение.

Исследование Космоса, зондирование поверхности Земли, современная связь, радиолокация, радионавигация и т.д. требуют построения радиотехнических систем все более высокочастотных диапазонов, вплоть до инфракрасного. Это обусловлено существенным возрастанием информационной емкости и разрешающей способности радиотехнических систем, неотъемлемой частью которых является антенная система. Для проектирования перечисленных радиотехнических систем требуется точное определение характеристик антенных систем и их аттестация. Эту задачу для широкого класса радиолокационных, радионавигационных, связных наземных и бортовых антенных систем успешно решает прогрессирующий метод автоматических измерений по зоне раскрытия испытываемой антенной системы [1–3]. Суть метода заключается в измерении посредством сканируемого зонда амплитудно – фазового распределения (АФР) ближнего поля антенны в дискретных точках поверхности измерения и последующем восстановлении дальнего поля с помощью алгоритмов быстрого преобразования Фурье.

Для таких измерений в диапазоне миллиметровых волн в [4] предложен сканер с подвижной линией передачи сигнала этого диапазона через участок <<сканируемый зонд – стационарная измерительная аппаратура>>. Цель – повышение точности измерения АФР путем снижения нестабильностей передаточной характеристики подвижной линии по фазе $\Delta\varphi_n$ и по мощности $\Delta\eta_n$. Линия передачи состоит из отрезков полых сверхразмерных металлических волноводов прямоугольного сечения с рабочей модой H_{10} и содержит фильтры для поглощения высших паразитных мод. В процессе сканирования зонда на плоскости измерения линия передачи с помощью соответствующих механизмов сканера синхронно работает со сканером так, что ее общая геометрическая длина остается неизменной. Это достигается применением двух трембонов, компенсирующих изменение длины линии. Они являются частями линии передачи и построены на тех же

сверхразмерных волноводах. Тромбоны поочередно работают при сканировании зонда вдоль координат X и Y по плоскости измерения. При перемещении зонда, установленного на подвижном конце линии передачи, вдоль одной из координат на расстояние L колено соответствующего тромбона одновременно перемещается на расстояние $L/2$ в направлении, требуемом для компенсации изменения в длине линии. Таким образом, общая геометрическая длина линии передачи в процессе сканирования зонда остается неизменной.

Существенными нерегулярностями предложенной линии являются стык зонда с линией, представляющий собой переход от открытого конца одномодового прямоугольного волновода к сверхразмерному многомодовому волноводу линии, 90° уголки сверхразмерных волноводов и подвижные сочленения последних. Конструкция подвижного сочленения изображена на рис. 1а.

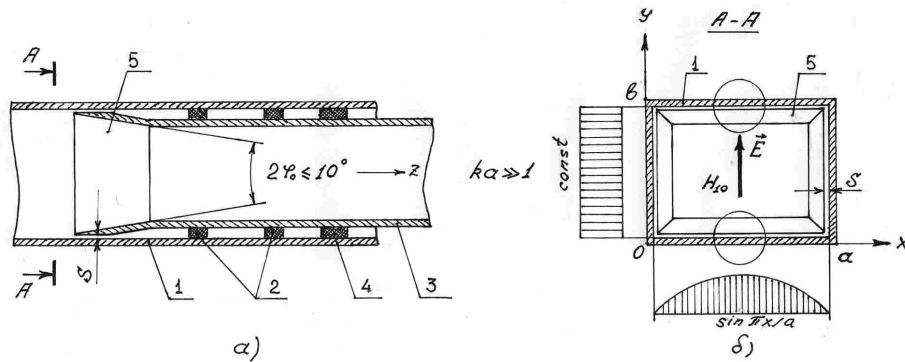


Рис. 1. Подвижное сочленение: 1 – внешний волновод, 2 – фторопластовые прокладки, 3 – внутренний волновод, 4 – поглотитель, 5 – рупорное окончание внутреннего волновода

Волноводы 1 и 3 соосно скользят относительно друг друга вдоль продольной оси Z благодаря прокладкам 2 из односторонне фольгированного фторопласта, напаянного фольгированной стороной на волновод 3 по внешнему периметру его сечения. Прокладки обеспечивают стабильность механических и электрических характеристик сочленения при относительном скольжении волноводов. За прокладками следует наклеенный также по периметру внешнего сечения внутреннего волновода 3 поглотитель 4 электромагнитной энергии. Он экранирует поле в волноводах от внешних полей и поглощает волны, возбужденные на нерегулярности сочленения и проникающие в пространство между внутренней поверхностью волновода 1 и внешней поверхностью волновода 3. Для снижения уровня возбуждаемых мод в сочленении конец внутреннего волновода 3 имеет рупорное окончание 5 с малым углом раскрытия $2\varphi_0 \leq 10^\circ$, а щель между стенками рупорного

окончания 5 и внутренними стенками волновода 1 составляет величину $S \leq 0,1\lambda$ (λ - длина рабочей волны).

Экспериментальное исследование макета низкочастотной модели такой линии передачи с одним компенсирующим tromбоном показало следующее. При внутреннем сечении волновода 1 - $a \cdot b = 56 \cdot 32 \text{ мм}^2$ и волновода 3 - $a \cdot b = 48 \cdot 24 \text{ мм}^2$, размере щели $S = 0,4 \text{ мм}$ и длине линии около 2м на частоте измерений $f = 33 \text{ ГГц}$ ($\lambda \approx 9,1 \text{ мм}$ и соответствующие параметры квазиоптического приближения $k = 2\pi/\lambda$ равны 39 и 33) нестабильность передаточной характеристики такой линии по фазе $\Delta\varphi_H$ составляла $\pm 7^\circ$, по мощности $\Delta\eta_H - \pm 0,5 \text{ дБ}$, а величина потерь линии - 2,44 дБ. Относительно большая величина потерь обусловлена частичным поглощением основной моды H_{10} в фильтрах типов мод линии. Измерения проводились с помощью измерительной линии P1-12 (8 – мм диапазона) при различных положениях оконечного короткозамкнутого сверхразмерного волновода (его суммарное перемещение составляло 80мм с шагом в 1,0мм) и при неизменности длины линии, осуществляемой на каждом шаге компенсацией изменения длины линии путем соответствующего перемещения колена сверхразмерного компенсирующего tromбона (суммарное перемещение 40мм с шагом в 0,5мм).

На рис.1б изображено сечение сочленения в плоскости А – А. С левой стороны и снизу показаны известные диаграммы распределения электрического поля $E = E_y \sim \sin \pi x/a$ основной рабочей моды H_{10} вдоль осей X и Y [5]. Кружки охватывают области щели, наиболее эффективные с точки зрения возбуждения паразитных мод. В этих областях щели поле имеет максимальное или близкое к нему значение.

Из физических соображений ясно, что для достижения меньших значений $\Delta\varphi_H$ и $\Delta\eta_H$ желательно выбрать такую рабочую моду, которая имела бы распределение поля, приближающееся к нулю на нерегулярности, в данном случае являющейся щелью между сочленяемыми волноводами. В качестве такой моды, при сочленяемых таким образом сверхразмерных круглых волноводах, может служить мода H_{01} . Она имеет лишь поперечную азимутальную компоненту электрического поля $E = E_\varphi \sim J_1(v_{11} r/a)$ (J_1 – функция Бесселя первого порядка, $v \approx 3,83$ – первый корень J_1 , a – радиус круглого волновода). Сечение такого сочленения на сверхразмерных круглых волноводах в аналогичной плоскости А – А (рис.1а) показано на рис.2а, а внизу этого рисунка показана диаграмма распределения поля вдоль радиуса. Поле равно нулю в центре и у стенок волновода, где имеется щель. Необходимость квазиоптического приближения, т.е. условия $ka_1 > ka_2 \gg 1$ (a_1 и a_2 – соответственно радиусы внешнего и внутреннего волноводов), следует из того факта, что в этом приближении мода H_{01} имеет весьма слабое затухание и малые потери преобразования на углах круглого волновода [6]. Однако эффективность применения этой моды снижается двумя факторами. Первый фактор - сложность изготовления перехода от зонда в виде прямоугольного одномодового волновода с модой H_{10} к сверхразмерному круглому с модой H_{01} .

Второй фактор – наличие вырожденной моды E_{11} , имеющей ту же критическую частоту. Для поставленной задачи минимизации нестабильности, а также и фазовой передаточной характеристики $\Delta\varphi_H$ последний фактор существенно снижает эффективность применения моды H_{01} . Потребуется наличие фильтров для подавления паразитных мод и, особенно, для вырожденной моды E_{11} , что выполнить непросто.

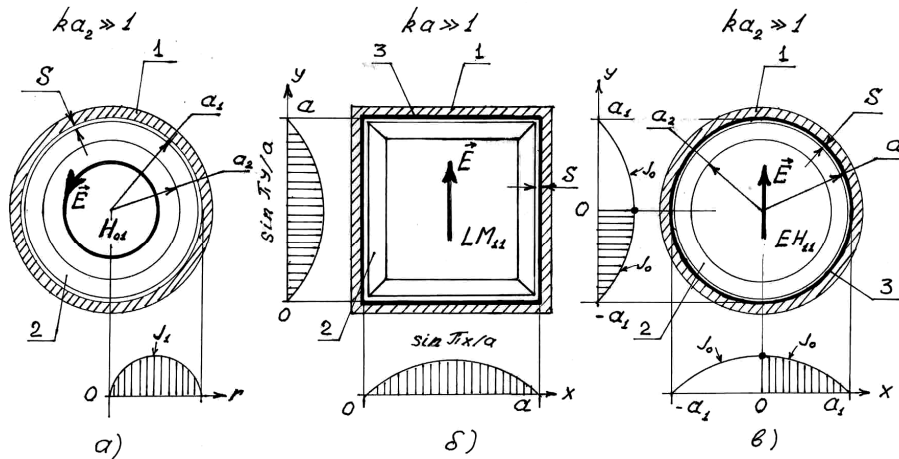


Рис.2. Сечения подвижного сочленения в плоскости А – А при различных конфигурациях волноводов: 1 – внешний волновод, 2 – рупорное окончание внутреннего волновода, 3 – слой диэлектрика

Другой возможный путь снижения $\Delta\varphi_H$ и $\Delta\eta_H$ предложенной квазиоптической линии – ее построение на сверхразмерных металлодиэлектрических волноводах (МДВ). В [7] показано, что в прямоугольных МДВ, покрытых изнутри слоем диэлектрика нерезонансной толщины ($kd\sqrt{\epsilon-1} \neq \pi n/2$, $n=1,2,3,\dots$; d – толщина слоя, ϵ – диэлектрическая проницаемость), при квазиоптическом приближении $ka \gg 1$ продольная магнитная волна моды LM_{11} имеет только поперечное линейно – поляризованное электрическое поле вида $E \sim (\sin \pi y/b) \cdot (\sin \pi x/a)$. Для случая МДВ квадратного сечения диаграммы распределения электрического поля показаны на рис.2б. Следствием такого распределения поля является концентрация энергии волны в центральной области волновода и спадающее до нулевого значения электрическое поле у стенок, что в нашем случае обеспечивает практически нулевое значение электрического поля по всему периметру щели. Таким образом, будем иметь весьма низкий уровень возбуждаемых на щели паразитных мод. Вдобавок, мода LM_{11} имеет весьма низкие потери распространения, малые потери преобразования на уголках (в обеих плоскостях), простой в изготовлении возбудитель. Кроме этого, что

весьма существенно, такая линия на МДВ обладает свойством повышенной самофилътрации от высших мод.

Аналогичными свойствами будет обладать предложенная линия передачи, если ее построить на круглых МДВ, опять в квазиоптическом приближении $ka \gg 1$, с рабочей модой EH_{11} . Электрическое поле этой моды является также поперечным и линейно поляризованным, но поле от центра волновода к краям спадает до нулевого значения по функции Бесселя J_0 нулевого порядка [8]. Диаграммы распределения поля E моды EH_{11} по осям X и Y в сечении круглого сверхразмерного волновода показаны на рис.2в. Слой диэлектрика опять же должен быть антирезонансной толщины. Затухание волны, как и в случае моды LM_{11} , существенно возрастает в областях частот, ширина которых очень узка и составляет величину порядка $(1/ka) \ll 1$. Наконец, отметим высокую эффективность возбуждения мод LM_{11} и EH_{11} с помощью простых в изготовлении возбуждателей с исходной модой H_{10} прямоугольного одномодового волновода, которая составляет не менее 0,93.

Следует ожидать эффективным построение предложенной линии передачи на МДВ с модами LM_{11} и EH_{11} с точки зрения не только уменьшения потерь при передаче сигнала и улучшения стабильности передаточных характеристик, но и возможности исключения фильтров для высших мод благодаря отмеченному выше свойству повышенной самофилътрации рассматриваемых линий на МДВ. Дополнительное преимущество в применении сверхразмерных МДВ обусловлено повышенными характеристиками узлов и элементов на их основе [9,10], являющихся входными узлами радиоизмерительной аппаратуры при антенных измерениях по ближнему полю [11,12]. Это интерферометры Маха-Цандера, квазиоптические делители мощности, аттенюаторы и смесители.

На рис.3 изображена блок – схема исследования квазиоптического фазовращателя телескопического типа с предложенным подвижным сочленением квадратных МДВ с рабочей LM_{11} модой [13].

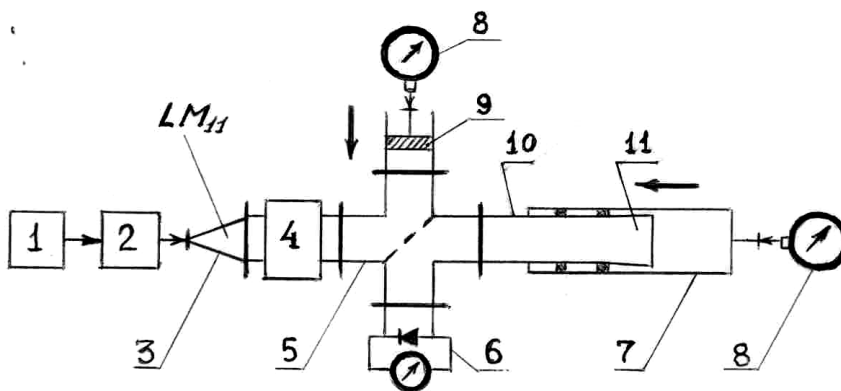


Рис.3. Блок – схема исследования квазиоптического фазовращателя

Измерения проводились с помощью крестообразного ответвителя 5 с полуотражающей пластиной по методике, изложенной в [14], на частоте $f=132 \text{ ГГц}$ с применением возбuditеля 3 моды LM_{11} и квазиоптического аттенюатора 4 [9], а также квазиоптической детекторной секции 6 [10]. В качестве генератора 1 применялась лампа обратной волны, чья мощность на измерительную схему подается через вентиль 2. Аттенюатором 4 измерялись значения $A^{\max}(\text{дБ})$ и $A^{\min}(\text{дБ})$ интерференционной волны в неподвижной детекторной секции 6 в зависимости от перемещения оконечного короткозамкнутого волновода 7 фазовращателя и соответствующего перемещения короткозамыкающего поршня 9. Одновременно индикатором перемещений 8 поршня 9 замерылись и смещения минимума интерференционной волны в секции 6. По значениям $A^{\max}(\text{дБ})$ и $A^{\min}(\text{дБ})$ вычислялись значения коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВН), а затем и потерь по мощности. Разброс значений последних определяет $\Delta\eta_n$. Из разброса значений разности соответствующих перемещений волновода 7 и поршня 9 (при измерениях смещения минимума интерференционной волны) определяется $\Delta\varphi_n$. Внутренние размеры волновода 10 фазовращателя - $14 \cdot 14 \text{ мм}^2$, волновода 7 - $16,5 \cdot 16,5 \text{ мм}^2$. Размер щели $S = 0,15 \text{ мм}$. Волноводы покрыты изнутри слоем фторопласта ($\epsilon = 2,07$) с толщиной $d=0,25 \text{ мм}$. Угол раскрытия рупорного окончания 11 составляет величину $2\varphi_0 \leq 10^\circ$.

При перемещении волновода 7 на расстояние 10 мм с шагом $0,1 \text{ мм}$ суммарные погрешности по фазе не превосходили $\pm 3,2^\circ$, по мощности - $\pm 0,25 \text{ дБ}$. Эти результаты косвенно подтверждают целесообразность и эффективность применения сверхразмерных МДВ при построении предложенной линии передачи, предназначенной для измерения параметров испытываемых антенн диапазона КММВ по их ближним полям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Herouni P.M.** History of NF-FF and Holography in the USSR // Trans. of X²V ESA Symp. on Antenna Measurements, ESTES, Netherlands, 1991. - P. 5-18.
2. **Joy E.B.** Near - field testing of radar antennas // Microwave Journal. - January 1990. - P. 119 - 130.
3. **Slater D.** A 550 GHz near-field antenna measurement system for the NASA submillimeter wave astronomy satellite // Antenna Measurement Techniques Association Conference. - October 3-7, 1994.
4. Патент N 2017164, Российская Федерация, МКИ G01R 29/08. Устройство для измерения распределения поля в раскрыте антенны / **В.Г. Аветисян** (РА). Приоритет изобретения 30.04.91. Оpubл. 30.07.94. Бюл. N 14.
5. **Семенов Н.А.** Техническая электродинамика. - М.: Связь, 1973. - 480 с.
6. **Anderson T.N.** State of the waveguide art // Microwave Journal. - December 1982. - P. 28-48.
7. **Казанцев Ю.Н., Харлашкин О.А.** Прямоугольные волноводы класса "полый диэлектрический канал" // Радиотехника и электроника. - 1978. - N 10. - С. 2060 - 2068.

8. **Казанцев Ю.Н., Харлашкин О.А.** Круглые волноводы класса <<полый диэлектрический канал>> // Радиотехника и электроника. – 1984. – N 8. – С. 1441 – 1450.
 9. **Айвазян М.Ц.** Функциональные элементы волноводных трактов на основе волноводов класса <<полый диэлектрический канал>> квадратного сечения для коротковолновой части миллиметрового диапазона длин волн: Дис... канд.техн. наук. – М.,1985. – 176 с.
 10. **Агабабян К.Р.** Функциональные элементы радиоприемных устройств коротковолновой части миллиметрового диапазона на основе квадратных металлодиэлектрических волноводов: Дис.... канд. физ-мат. наук. – Ереван, 1992. – 123 с.
- Аветисян В.Г.** К измерению параметров антенн коротковолновой части миллиметрового диапазона // Известия НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. – 1995. – Т. 49, N2. – С.114 -119.
11. Արտոնագիր N 1013, Հայաստանի Հանրապետություն, ՄԱԴ G01R 29/08.// Անտենայի բացվածքում դաշտի բաշխվածությունը չափող սարք / **Վ.Հ. Ավետիսյան** (ՀՀ): Առաջնության թվ. 29 08 2000: Հրապարակման թվ. 17.02.2001: ՊՏ N 3.
 12. Արտոնագիր N 366, Հայաստանի Հանրապետություն, ՄԱԴ H01Q 15/06 // Քվադրոպոտիկական Ֆազաշրջիչ / **Վ.Ռ. Աղաբաբյան, Ռ.Ս. Ավագյան, Վ.Հ. Ավետիսյան** (ՀՀ): Առաջնության թվ. 01.07.96: Հրապարակման թվ. 08.08.97: ՊՏ N 1:
 13. **Bled J., Bresson A., Popouler P., Wegrowe J.G.** Nouvelles techniques d'utilisation des ondes millimetriques et submillimetriques // L'onde Electrique. – 1964. – N 442, Janvier. – P. 26-35.

ЗАО “РАО МАРС”. Материал поступил в редакцию 16.08.2004.

Վ.Հ. ԱՎԵՏԻՍՅԱՆ

ՄԵՏԱՂԱՄԵԿՈՒՄԻՉ ԱԼԻՔՍԱՐՆԵՐԻ ԿԻՐԱՌՈՒՄԸ ԿԱՐՃ ՄԻԼԻՄԵՏՐԱՆՈՑ ԱԼԻՔՆԵՐԻ ՏԻՐՈՒՑԹԻ ԱՆՏԵՆԱՅԻՆ ՉԱՓՈՒՄՆԵՐՈՒՄ

Քննարկվում է սնամեջ մետաղամեկուսիչ գերչափ ալիքատարների և դրանց վրա հիմնված տարրերի կիրառումը կարճ միլիմետրանոց ալիքների տիրույթի ազդանշանի փոխանցման գծում և ապարատության մուտքային հանգույցներում, որոնք օգտագործվում են կարճ միլիմետրանոց ալիքների տիրույթի անտենաների մոտակա դաշտի ամպլիտուդա-փուլային բաշխվածության չափումներում:

Առանցքային բառեր. անտենային չափումներ, մոտակա դաշտ, մետաղամեկուսիչ ալիքատարներ, քվադրոպոտիկական մոտավորություն:

V. H. AVETISYAN

APPLICATION OF METAL-DIELECTRIC WAVEGUIDES IN SHORT MILLIMETER WAVEBAND ANTENNA MEASUREMENTS

Problems of hollow metal-dielectric superdimensional waveguides and elements on their basis in short millimeter waveband transmission line and in input units of the apparatus for measuring near-field amplitude-phase distribution of short millimeter waveband antennas are discussed.

Keywords: antenna measurements, near-field, metal-dielectric waveguides, quasi-optical approximation.

А.А. ТЕРЗЯН, Г.Г. САРКИСЯН

ПАРАЛЛЕЛЬНЫЕ АЛГОРИТМЫ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ

Рассмотрены и реализованы параллельные алгоритмы случайного поиска, генетического и градиентного методов с использованием их особенностей по естественному восприятию параллельных схем вычисления. На реальной тестовой задаче проведен сопоставительный анализ развитых алгоритмов. Показано, что все рассмотренные алгоритмы эффективно решают многопараметрические нелинейные экстремальные задачи. Вместе с тем генетический и градиентный параллельные алгоритмы по скорости сходимости несколько уступают параллельному алгоритму случайного поиска.

Ключевые слова: генетический алгоритм, градиентный алгоритм, алгоритм случайного поиска, параллельные алгоритмы нелинейного математического программирования.

Появление за последние годы вычислительных кластеров открыло новые возможности по более эффективному решению многопараметрических задач принятия решения.

В этой связи, наряду с принятой практикой распараллеливания последовательных программ посредством имеющихся всевозможных стандартных процедур, представляется чрезвычайно интересным использование естественных свойств многих алгоритмов к восприятию параллельных структур с целью повышения их эффективности. По существу, речь идет о качественном развитии алгоритмов принятия решения с введением новых операторов, использующих элементы параллелизма.

В [1] алгоритмы принятия решения условно подразделены на алгоритмы, основанные на: моделях поведения живых организмов; моделях эволюции живых организмов; точных математических процедурах.

В настоящей работе из указанных классов алгоритмов выделим по одному из наиболее характерных алгоритмов и представим их параллельные аналоги. В частности, рассмотрим алгоритмы случайного поиска, генетического и градиентного методов.

Алгоритмы случайного поиска, организующие целенаправленное управление введением элемента случайности как источника возможностей, отличаются большим разнообразием. Из этого разнообразия примем к рассмотрению алгоритм наилучшей пробы, при котором делается m случайных проб и по наилучшей выборке осуществляется рабочий шаг. Очевидно, что в данном алгоритме целесообразно число случайных выборок m принять равным либо кратным числу используемых параллельных процессоров P_N . Примем также, что случайные выборки осуществляются в пределах гипер-

сферы, где радиус гиперсферы определяет размер пробных шагов h_t , а плотность распределения случайных точек на гиперсфере постоянна.

Для управления длиной шага перемещения h_t примем значение $\xi = (F_{t+1}(x) - F_t(x)) / F_t(x)$ отклонения целевой функции $F(\bar{x})$ в $(t+1)$ -й и t -й итерациях. В случае успешного продвижения ($\xi \leq \Delta$, где Δ – заданное число) шаг увеличивается, в случае $\xi > \Delta$ – уменьшается. Оптимальную точку будем считать найденной, если в процессе поиска экстремума шаг снизится до предельно заданного.

Итак, для решения экстремальной задачи

$$F(\bar{x}) = F(x_1, x_2, \dots, x_n) \rightarrow \min_{\bar{x} \in D} \Rightarrow \bar{x}^* \quad (1)$$

с ограничениями

$$D : \varphi_i(\bar{x}) = \varphi_i(x_1, x_2, \dots, x_n) \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, l \quad (2)$$

(где $F(\bar{x})$ – целевая функция; $\bar{x}$ – вектор варьируемых независимых переменных; n – число варьируемых переменных; $\varphi_i(\bar{x})$ – ограничения; l – число ограничений; D – допустимая область) управление рассмотренного алгоритма случайного поиска имеет следующий вид:

$$\begin{cases} \frac{F_{t+1}(\bar{x}) - F_t(\bar{x})}{F_t(\bar{x})} \geq \Delta, & h_{t+1} = K_U h_t; \\ \frac{F_{t+1}(\bar{x}) - F_t(\bar{x})}{F_t(\bar{x})} < \Delta, & h_{t+1} = \frac{h_t}{K_U}; \\ h_{\min} \leq h_t \leq h_{\max}. \end{cases} \quad (3)$$

Здесь h_t – текущее значение шага; K_U – коэффициент управления длиной шага; $h_{\min}, h_{\max}$ – соответственно заданные минимальное и максимальное значения шага перемещения.

Для входа в допустимую область D используем дополнительную неотрицательную функцию

$$Q(\bar{x}) = \sum_{\varphi_i(\bar{x}) < 0} \frac{|\varphi_i(\bar{x})|}{|\varphi_i(\bar{x}) + 1|}. \quad (4)$$

Параллельная работа вычислителей открывает широкие возможности для формирования различных генетических алгоритмов. Рассмотрим два из них.

Примем число параллельно работающих процессоров P_N равным числу варьируемых переменных n . Начальную популяцию N_p , образованную по-средством генератора случайных чисел, равномерно распределим на под-

популяции, число которых равно числу параллельно работающих процессоров P_N (рис.1).

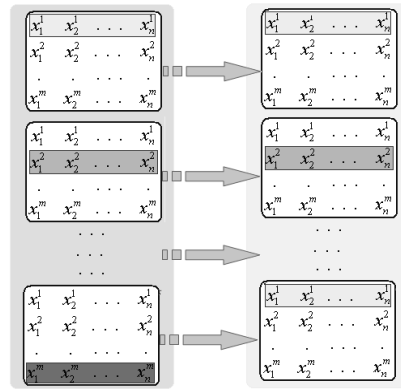


Рис.1

В каждой подпопуляции $N_p^{(m)}$ оператор селекции в соответствии со значением функции приспособленности осуществляет отбор хромосом с целью их участия в последующем процессе репродукции, путем скрещивания с участием оператора мутации. Порожденные новые элементы образуют новую подпопуляцию. В качестве критерия останова примем минимальное значение ξ – отклонения целевой функции $F(\bar{x})$ в худшей строке среди всех подпопуляций в $(t+1)$ -й и t -й итерациях.

В следующем алгоритме наряду с основными операторами селекции, скрещивания и мутации введем дополнительный оператор миграции, который предусматривает миграцию (перемещение) лучших решений в подпопуляциях в последующую одну (островную) подпопуляцию (рис.2) с сохранением числа подпопуляций.

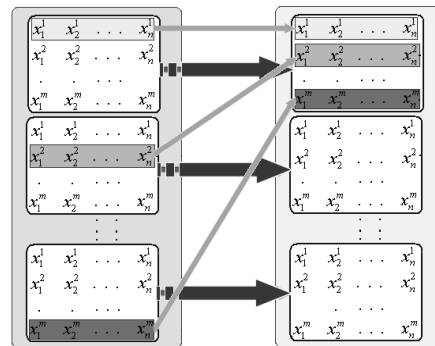


Рис. 2

Решение задачи (1) с ограничениями (2) в принятом градиентном алгоритме осуществляется следующим образом.

В допустимой области D в каждой текущей точке осуществляется движение

$$\bar{x}_{t+1} = \bar{x}_t + \bar{\delta}h \quad (5)$$

по направлению

$$\bar{\delta} = -\text{grad}F(\bar{x}) = -\sum_{i=1}^n \frac{\Delta F(\bar{x}_t)}{\Delta \bar{x}_{it}} \bar{e}_i \quad (6)$$

с шагом h . Здесь $\bar{e}_i (i = 1, 2, \dots, n)$ - орты пространства $x_1, x_2, \dots, x_n$.

Вне допустимой области при входе либо возврате в допустимую область D направление движения определяется по $-\text{grad}Q(x)$.

В процессе движения по (5) при достижении условия коллинеарности

$$\text{grad}F_t(\bar{x}) \parallel \text{grad}Q_t(\bar{x}) \quad (7)$$

осуществляется уменьшение шага h_t посредством коэффициента управления длиной шага K_U , т.е.

$$h_{t+1} = h_t K_U. \quad (8)$$

Оптимум считается найденным, если шаг, уменьшаясь, достигает наперед заданного минимального значения ($h_t \leq h_{\min}$).

Для описанного градиентного алгоритма наиболее естественным является параллельное вычисление частных производных функций $F(\bar{x})$ и $Q(\bar{x})$ для определения направления движения. В этом случае число необходимых параллельных процессоров P_N определяется размерностью задачи (n).

Для сопоставительного анализа рассмотренных алгоритмов осуществим структурную адаптацию генетических алгоритмов, затем параметрическую адаптацию участвующих в эксперименте алгоритмов.

В качестве тестовой задачи, как и в [1], примем задачу оптимизации синхронного явнополюсного генератора мощностью 20 кВт. Задачу оптимизации сформулируем следующим образом. Найти минимальный активный объем генератора $D_a^2 l$ вариацией внешнего диаметра D_a , относительного диаметра расточки статора D_i/D_a , относительной высоты спинки статора $2h_a/(D_a - D_i)$, относительной ширины паза d/t и длины статора l при одиннадцати ограничениях типа неравенств. Таким образом, решается пятимерная оптимизационная задача, что в нашей постановке задачи распараллеливания требует 5 параллельных процессоров кластера.

В табл. 1 приведены результаты численных экспериментов по двум описанным генетическим алгоритмам без использования оператора миграции (Gen1) и с использованием этого оператора (Gen2) при прочих равных условиях.

Таблица 1

Нач. положени е	Координаты варьируемых переменных в оптимальной точке					F(X)x 10 ³ ,см ³	T, c	N
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅			
Gen1								
7	372,638	0,682	0,687	0,600	113,133	15,71	1,29	11030
256	369,083	0,676	0,685	0,602	114,834	15,643	0,907	11928
41	361,085	0,679	0,684	0,604	117,103	15,268	1,291	11046
3289	361,125	0,676	0,681	0,604	117,705	15,35	1,377	13686
92	369,157	0,674	0,667	0,593	114,660	15,626	1,403	9624
Gen2								
7	369,719	0,718	0,798	0,610	111,000	15,173	0,652	7140
256	370,203	0,718	0,794	0,610	111,000	15,213	0,736	5100
41	369,234	0,719	0,798	0,610	111,000	15,133	0,596	7140
3289	368,750	0,720	0,798	0,610	111,422	15,151	0,74	7740
92	369,719	0,720	0,798	0,610	111,105	15,187	0,592	7860

Как видно из табл. 1, миграция лучших поколений в островную подпопуляцию приводит к ускорению процесса сходимости, что дает нам основание в дальнейшем анализе использовать именно этот параллельный генетический алгоритм.

Для параметрической адаптации принятого алгоритма определим целе-сообразные значения количества мигрантов K_M в миграции лучших особей и величины начальной популяции N_P .

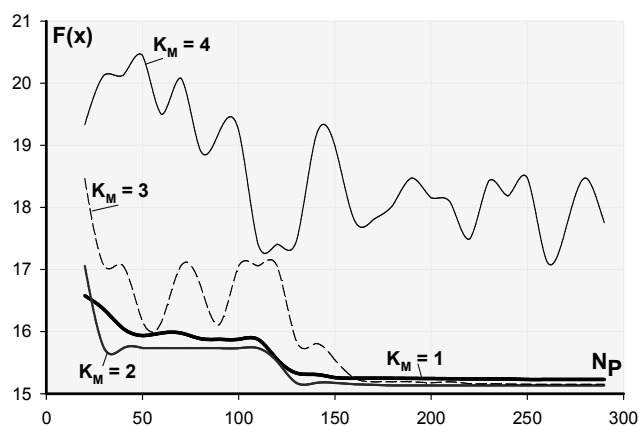


Рис. 3

Как видно из рис. 3, наилучшего значения целевой функции генетическая поисковая система достигает при начальной популяции $N_p = 130$ (т.е. при 5-процессорном кластере каждая подпопуляция равна 26) и коэффициенте миграции (количестве мигрантов с каждой подпопуляции $K_M = 2$). В соответствии с [1] эксперименты проводились при селекции $\Delta_C = 80\%$ и мутации $M = 4\%$.

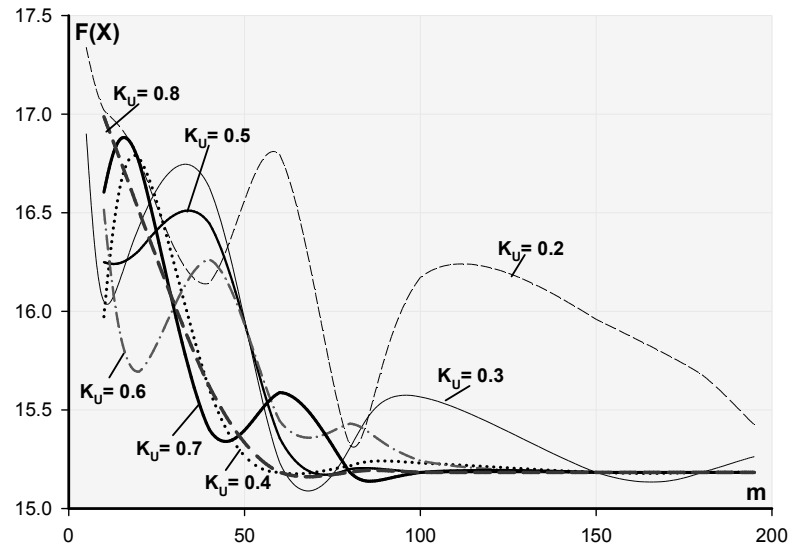


Рис. 4

На рис. 4 показаны результаты численных экспериментов для адаптации управляющих параметров параллельного алгоритма случайного поиска. В соответствии с полученными результатами приняты следующие значения управляющих параметров: количество выборок $m = 60$, значение коэффициента управления текущим шагом $K_U = 0,4$. Заметим, что эксперименты проведены при начальном $h_{нач} = 0,1$ и конечном $h_{мин} = 0,0001$ шагах.

На рис. 5 представлены результаты экспериментов с целью выявления поведения управляющих параметров рассмотренного параллельного градиентного алгоритма. Как видно из полученных результатов, наилучшее значение целевой функции $F(\bar{x})$ получено при коэффициенте управления длиной шага $K_U = 0,98$ и начальном шаге $h_{нач} = 0,4$. В эксперименте, как и при случайном поиске, $h_{мин} = 0,0001$.

Приняв полученные настройки в качестве базовых, был проведен комплекс численных экспериментов по решению поставленной задачи рассмотренными параллельными алгоритмами из различных начальных позиций. Результаты экспериментов представлены в табл. 2.

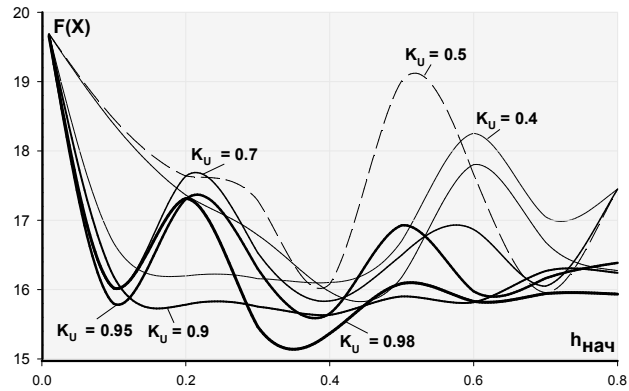


Рис. 5

Таблица 2

Нач. положение	Координаты варьируемых переменных в оптимальной точке					F(X)× 10³ см³	Т, с	N
	X₁	X₂	X₃	X₄	X₅			
Генетический Gen2								
324	372,625	0,715	0,781	0,610	111,0	15,412	0,642	9716
156	369,234	0,719	0,798	0,610	111,0	15,133	1,052	16410
6978	369,234	0,719	0,798	0,610	111,0	15,133	0,954	14124
121	369,234	0,719	0,798	0,610	111,0	15,133	0,893	14950
61	372,627	0,718	0,796	0,609	111,0	15,412	0,804	11694
9725	369,719	0,718	0,797	0,610	111,0	15,173	0,831	13006
Случайный поиск								
10	367,78 5	0,723	0,798	0,610	113,257	15,322	0,084	2460
324	368,356	0,724	0,798	0,610	113,905	15,455	0,078	2800
156	368,72 7	0,720	0,798	0,610	112,0	15,227	0,143	6600
6978	369,958	0,718	0,787	0,610	112,0	15,329	0,063	2740
121	368,651	0,720	0,798	0,610	112,00	15,221	0,123	5600
61	368,627	0,720	0,798	0,610	112,301	15,260	0,111	4300
9725	369,555	0,721	0,798	0,610	112,0	15,296	0,118	4080
Градиентный								
10	379,101	0,701	0,726	0,610	112,0	16,096	0,348	3817
324	368,650	0,720	0,798	0,610	112,0	15,221	0,3	3367
156	361,0	0,674	0,663	0,608	118,872	15,491	1,107	13015
6978	361,0	0,671	0,655	0,605	119,782	15,61	0,891	9531
121	361,001	0,669	0,652	0,610	120,026	15,642	0,682	8013
61	361,001	0,667	0,653	0,609	120,181	15,662	0,612	6969
9725	362,032	0,670	0,656	0,595	117,846	15,446	0,812	9393

Из анализа полученных результатов явствует, что все рассмотренные параллельные алгоритмы эффективно решают многопараметрические нелинейные экстремальные задачи, имея примерно одинаковую точность решения. Вместе с тем генетический и градиентный параллельные алгоритмы по скорости сходимости несколько уступают параллельному алгоритму случайного поиска.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Терзян А.А., Саркисян Г.Г. Генетические алгоритмы принятия решения // Известия НАН РА и ГИУА. Сер. ТН.-2005. – Т. 58, № 1.-С. 147-153.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 20.06.2005.

Հ.Ա. ԹԵՐԶՅԱՆ, Գ.Գ. ՍԱՐԳՍՅԱՆ

ՈՐՈՇՈՒՄՆԵՐԻ ԸՆԴՈՒՆՄԱՆ ԶՈՒԳԱՆԵՐ ԱԼԳՈՐԻԹՄՆԵՐ

Դիտարկված և իրականացված են պատահական որոնման, գենետիկ և գրադիենտային զուգահեռ ալգորիթմները՝ օգտագործելով վերջինների զուգահեռ հաշվողական սխեմաների ընկալման առանձնահատկությունները: Ռեալ տեսության խնդրի միջոցով իրականացվել է համեմատական վերլուծություն: Ցույց է տրվել, որ բոլոր դիտարկված ալգորիթմները արդյունավետ լուծում են բազմապարամետրային ոչ գծային էքստրեմալ խնդիրները: Միևնույն ժամանակ, գենետիկ և գրադիենտային զուգահեռ ալգորիթմները զուգամիտման արագությամբ որոշակի չափով զիջում են պատահական որոնման զուգահեռ ալգորիթմներին:

Առանցքային բառեր. գենետիկ ալգորիթմ, գրադիենտային ալգորիթմ, պատահական որոնման ալգորիթմ, ոչ գծային մաթեմատիկական ծրագրավորման զուգահեռ ալգորիթմներ:

H.A. TERZYAN, G.G. SARGSYAN

PARALLEL ALGORITHMS FOR DECISION MAKING

Parallel algorithms of random search, genetic and gradient methods using their characteristics for natural perceptions of parallel computation are developed and realized. The comparative analysis of developed algorithms are given. It is shown that all discussed algorithms effectively solve multiparameter nonlinear extremum tasks. Besides, genetic and gradient parameter algorithms by convergence speed somewhat yield the parallel algorithm of random search.

Keywords: genetic algorithm, gradient algorithm, algorithm of a random search, parallel algorithms of nonlinear mathematical programming.

Ф.П. ГРИГОРЯН

СИНТЕЗ МНОГОМЕРНОГО УПРАВЛЕНИЯ С НАПЕРЕД ЗАДАННЫМ
СПЕКТРОМ

Рассматривается задача синтеза выбора многомерного управления с наперед заданным спектром общего вида в стационарной интегро-дифференциальной системе уравнений. Получена формула, выражающая зависимость между коэффициентом входного сигнала регулятора и наперед заданным спектром.

Ключевые слова: синтез управления, желаемый спектр, многомерное управление, импульсная переходная функция, передаточная функция.

Постановка задачи. Пусть задана следующая управляемая система:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = Ax + Hu, \\ u = \int_{-\infty}^t G(t-t')v(t')dt', \Rightarrow \frac{dx}{dt} = Ax + H \int_{-\infty}^t G(t-t')bx(t')dt', \\ v = bx, \end{cases} \quad (1)$$

где $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$ - вектор состояния процесса; v - скаляр (входной сигнал регулятора); $G = (g_1, g_2, \dots, g_m)^T$ - импульсная переходная функция регулятора; $U = (u_1, u_2, \dots, u_m)^T$ - многомерное управляющее воздействие (выходной сигнал регулятора); $A = (a_{ij})$, $i, j = \overline{1, n}$; $b = (b_1, b_2, \dots, b_n)$; $H = (H_{ij})$, $i = \overline{1, n}$, $j = \overline{1, m}$.

Наперед заданный спектр имеет следующий вид:

$$\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{n_1}; \underbrace{\mu, \mu, \dots, \mu}_{n_2 \text{ шт}}; \underbrace{0, 0, \dots, 0}_{n_3 \text{ шт}}; \quad n_1 + n_2 + n_3 = n \quad (2)$$

при условиях:

- 1) $\lambda_i \neq \lambda_j$, $i \neq j$, $i, j = \overline{1, n_1}$, $\mu \neq \lambda_i$, $\mu \neq 0$;
- 2) $\lambda_i \neq \psi_i$, $i = \overline{1, n_1}$, $j = \overline{1, n}$, где ψ_i - собственные числа матрицы A и $\psi_i \neq \psi_j$, $i \neq j$, $i, j = \overline{1, n}$;

3) $\psi_i \neq \mu, \psi_i \neq 0, i = \overline{1, n}$.

Требуется построить $b = (b_1, b_2, \dots, b_n)$ так, чтобы решение системы (1) имело вид

$$x = \tilde{K}y,$$

где $\tilde{K}$ - некоторая невырожденная матрица порядка $n \times n$, подлежащая определению;

$$\begin{cases} \dot{y}_{i_1} = \lambda_{i_1} y_{i_1} & i_1 = \overline{1, n_1}, \\ \dot{y}_{i_2} = \mu y_{i_2} & i_2 = n_1 + 1, \dots, n_1 + n_2, \\ \dot{y}_{i_3} = 0 y_{i_3} & i_3 = n_1 + n_2 + 1, \dots, n, \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} y_{i_1} = e^{\lambda_{i_1} t} C_{i_1}, \\ y_{i_2} = e^{\mu t} C_{i_2}, \\ y_{i_3} = C_{i_3}, \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} y^{(1)} = e^{\Lambda_{n_1} t} C^{(n_1)}, \\ y^{(2)} = e^{\mu t} C^{(n_2)}, \\ y^{(3)} = C^{(n_3)}, \end{cases}$$

где $\Lambda_1 = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{n_1})$; $C^{(n_1)} = (C_1, \dots, C_{n_1})^T$; $C^{(n_2)} = (C_{n_1+1}, \dots, C_{\alpha})^T$;

$C^{(n_3)} = (C_{\alpha+1}, \dots, C_n)^T$ - столбцы из произвольных постоянных, а

$$y^{(1)} = (y_1, \dots, y_{n_1})^T, \quad y^{(2)} = (y_{n_1+1}, \dots, y_{\alpha})^T, \quad y^{(3)} = (y_{\alpha+1}, \dots, y_n)^T, \\ (\alpha = n_1 + n_2), \quad y = (y^{(1)}, y^{(2)}, y^{(3)})^T.$$

Предполагается также, что имеют место и следующие условия для передаточной функции $W(p) = \int_0^{\infty} G(s) e^{-ps} ds$ регулятора [4]:

$$4) \quad \left. \frac{d^i W(p)}{dp^i} \right|_{p=\mu} = (0, 0, \dots, 0)^T, \quad i = \overline{1, n_2 - 1}; \quad \left. \frac{d^i W(p)}{dp^i} \right|_{p=0} = (0, 0, \dots, 0)^T, \quad i = \overline{1, n_3 - 1};$$

5) Нули и полюсы $W(p)$ не совпадают с элементами спектра (2).

Решение задачи. Обозначим через Ω матрицу собственных векторов [3] матрицы A : $\Omega = (\Omega_1, \Omega_2, \dots, \Omega_n)$. Выполним в системе (1) преобразование подобия

$$x = \Omega z,$$

где $z = (z_1, \dots, z_n)^T$ - вектор преобразованных переменных состояния. При этом получим

$$\frac{dz}{dt} = \Lambda z + H_0 \int_{-\infty}^t G(t-t') qz(t') dt', \quad (3)$$

где

$$\Lambda = \text{diag}(\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_n), \quad H_0 = \Omega^{-1} H, \quad q = b\Omega = (q_1, q_2, \dots, q_n). \quad (4)$$

Теперь сделаем в системе (3) замену переменных

$$z = \tilde{K}y, \quad \tilde{K} = K\chi(t), \quad (5)$$

где матрица $\chi(t)$ преобразует систему

$$\dot{\eta}(t) = J\eta(t) \quad (6)$$

(здесь $J = \text{diag}(\Lambda_1, \Gamma_2 + \mu E_2, \Gamma_3)$, $\chi(t) = \text{diag}(\chi_1(t), \chi_2(t), \chi_3(t))$, где $\chi_1(t) \equiv E_1(t)$, $E_2(t)$ – единичные матрицы порядка n_1 и n_2 соответственно; Γ_2 и Γ_3 – матрицы сдвига [1] порядка n_2 и n_3 соответственно, а $\chi_2(t) = \exp(\Gamma_2 t)$, $\chi_3(t) = \exp(\Gamma_3 t)$ – в диагональную форму с матрицей

$$\Lambda = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{n_1}; \underbrace{\mu, \mu, \dots, \mu}_{n_2 \text{ } \emptyset \emptyset}, \underbrace{0, 0, \dots, 0}_{n_3 \text{ } \emptyset \emptyset}). \quad (7)$$

В интеграле правой части (3) сделаем замену переменной $t - t' = s$:

$$\frac{dz}{dt} = \Lambda z + H_0 \int_0^\infty G(s) qz(t-s) ds.$$

Матрицы $\tilde{K}$ и K представим в следующем блочном виде [5]:

$$\begin{aligned} \tilde{K} &= (\tilde{K}_{(n_1)}, \tilde{K}_{(\alpha\alpha)}, \tilde{K}_{(n)}), \quad \tilde{K}_{(n_1)} = (\tilde{K}_1, \dots, \tilde{K}_{n_1}), \quad \tilde{K}_{(\alpha\alpha)} = (\tilde{K}_{n_1+1}, \dots, \tilde{K}_\alpha), \\ \tilde{K}_{(n)} &= (\tilde{K}_{\alpha+1}, \dots, \tilde{K}_n), \quad \alpha = n_1 + n_2, \\ K &= (K_{(n_1)}, K_{(\alpha\alpha)}, K_{(n)}), \quad K_{(n_1)} = (K_1, \dots, K_{n_1}), \quad K_{(\alpha\alpha)} = (K_{n_1+1}, \dots, K_\alpha), \\ K_{(n)} &= (K_{\alpha+1}, \dots, K_n). \end{aligned}$$

Обозначим

$$U(p) = \Lambda + H_0 \int_0^\infty G(s) e^{-ps} ds. \quad (8)$$

Произведя аналогичные преобразования подобно [5], получим

$$\begin{aligned} \begin{cases} U(\lambda_1)K_1 = \lambda_1 K_1, \\ U(\lambda_2)K_2 = \lambda_2 K_2, \\ \vdots \\ U(\lambda_{n_1})K_{n_1} = \lambda_{n_1} K_{n_1}; \end{cases} & \begin{cases} (U(\mu U(\mu) - \mu_{n_1+1}) = 0, \\ (U(\mu U - \mu E)K_{n_1+2} = K_{n_1+1}, \\ \vdots \\ (U(\mu U - \mu E)K_\alpha = K_{\alpha-1}; \end{cases} & \begin{cases} U(0)K_{\alpha+1} = 0, \\ U(0)K_{\alpha+2} = K_{\alpha+1}, \\ \vdots \\ U(0)K_n = K_{n-1}. \end{cases} \end{aligned} \quad (9)$$

$$\alpha = n_1 + n_2$$

Когда определяется $q = b\Omega$, тогда из (9) определяются и столбцы $K_1, K_2, \dots, K_n$.

Теперь перейдем к определению $q = b\Omega$. Рассмотрим подсистемы (9). Исследуем первую часть из (9). Упростим вид матрицы $U(\lambda_i)$, $i = \overline{1, n_1}$. Из (4) разделим матрицу H_0 на блоки следующим образом:

$$H_0 = \begin{pmatrix} h_1 \\ \dots \\ \dots \\ h_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_{11} & h_{12} & \dots & h_{1m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ h_{n1} & h_{n2} & \dots & h_{nm} \end{pmatrix}.$$

Имея в виду, что $W(\lambda_i) = (W_1(\lambda_i), W_2(\lambda_i), \dots, W_m(\lambda_i))^T$, $i = \overline{1, n_1}$, из (8) находим

$$U(\lambda_i) = \Lambda + H_0 W(\lambda_i) q = \begin{pmatrix} \psi_1 & & & 0 \\ & \psi_2 & & \\ & & \dots & \\ & & & \dots \\ 0 & & & \psi_n \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} h_1 \\ h_2 \\ \dots \\ h_n \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} W_1(\lambda_i) \\ W_2(\lambda_i) \\ \dots \\ W_m(\lambda_i) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} q_1 \\ q_2 \\ \dots \\ q_n \end{pmatrix}^T =$$

$$= \begin{pmatrix} \psi_1 + p_1(\lambda_i)q_1 & p_1(\lambda_i)q_2 & \dots & p_1(\lambda_i)q_n \\ p_2(\lambda_i)q_1 & \psi_2 + p_2(\lambda_i)q_2 & \dots & p_2(\lambda_i)q_n \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ p_n(\lambda_i)q_1 & p_n(\lambda_i)q_2 & \dots & \psi_n + p_n(\lambda_i)q_n \end{pmatrix},$$

где $p_j(\lambda_i) = h_j W(\lambda_i) = \sum_{k=1}^m h_{jk} W_k(\lambda_i)$, $i = \overline{1, n_1}$, $j = \overline{1, n}$.

Согласно пятому условию задачи и из (8) следует

$$p_j(\lambda_i) \neq 0, \quad i = \overline{1, n_1}, \quad j = \overline{1, n}. \quad (10)$$

Характеристический многочлен [2] матрицы $U(\lambda_i)$, $i = \overline{1, n_1}$ имеет вид

$$|U(\lambda_i) - \lambda E| = \prod_{i_1=1}^n (\psi_{i_1} - \lambda) + p_1(\lambda_i)q_1 \prod_{\substack{i_1=1 \\ i_1 \neq 1}}^n (\psi_{i_1} - \lambda) + p_2(\lambda_i) \prod_{\substack{i_1=1 \\ i_1 \neq 2}}^n (\psi_{i_1} - \lambda) + \dots +$$

$$+ p_n(\lambda_i)q_n \prod_{\substack{i_1=1 \\ i_1 \neq n}}^n (\psi_{i_1} - \lambda), \quad i = \overline{1, n_1}. \quad (11)$$

Обозначим

$$\delta(\lambda) = \prod_{i_1=1}^n (\psi_{i_1} - \lambda), \quad \delta_j(\lambda) = \prod_{\substack{i_1=1 \\ i_1 \neq j}}^n (\psi_{i_1} - \lambda), \quad j = \overline{1, n}. \quad (12)$$

Разложив каждый многочлен $\delta(\lambda)$ и $\delta_j(\lambda)$ относительно степеней λ , имеем

$$\delta(\lambda) = (-\lambda)^n + a_1(-\lambda)^{n-1} + a_2(-\lambda)^{n-2} + a_3(-\lambda)^{n-3} + \dots + a_n,$$

$$\delta_j(\lambda) = (-\lambda)^{n-1} + a_{1j}(-\lambda)^{n-2} + a_{2j}(-\lambda)^{n-3} + \dots + a_{n-1,j}, \quad j = \overline{1, n},$$

где коэффициенты $a_1, a_2, \dots, a_n, a_{1j}, a_{2j}, \dots, a_{n-1,j}$ определяются через $\psi_i, i = \overline{1, n}$ по теореме Виета [3]. Благодаря второму условию задачи и из (12) заключаем, что

$$\delta_j(\lambda_i) \neq 0, \quad i = \overline{1, n_1}, \quad j = \overline{1, n}. \quad (13)$$

Согласно (12), характеристический многочлен (11) приобретает вид

$$\begin{aligned} |U(\lambda_i) - \lambda E| &= \delta(\lambda) + p_1(\lambda_i)q_1\delta_1(\lambda) + p_2(\lambda_i)q_2\delta_2(\lambda) + \dots + \\ &+ p_n(\lambda_i)q_n\delta_n(\lambda), \quad i = \overline{1, n_1}. \end{aligned} \quad (14)$$

Подставив в (14) $\lambda = \lambda_i, i = \overline{1, n_1}$ и имея в виду (10) и (13), получаем следующую подсистему относительно $q_1, q_2, \dots, q_n$:

$$\sum_{j=1}^n p_j(\lambda_i)\delta_j(\lambda_i)q_j = -\delta(\lambda_i), \quad i = \overline{1, n_1}. \quad (15)$$

Теперь исследуем вторую часть из (9), откуда следует, что K_{n_1+1} является собственным вектором матрицы $U(\mu)$, а число μ - корнем кратности n_2 для характеристического многочлена $|U(\mu) - \lambda E|$.

Аналогично (14) характеристический многочлен для матрицы $U(\mu) = \Lambda + W(\mu)$ имеет вид

$$|U(\mu) - \lambda E| = \delta(\lambda) + p_1(\mu)q_1\delta_1(\lambda) + p_2(\mu)q_2\delta_2(\lambda) + \dots + p_n(\mu)q_n\delta_n(\lambda). \quad (16)$$

Наложим на $(q_1, q_2, \dots, q_n)$ условия [5], при которых $\lambda = \mu$ являлись бы корнем кратности n_2 для многочлена (16). Дифференцируя (16) n_2-1 раз и подставляя туда $\lambda = \mu$, с учетом пятого условия задачи получим следующую подсистему из n_2 уравнений относительно $q_1, q_2, \dots, q_n$:

$$\sum_{j=1}^n p_j(\mu)q_j\delta_j^{(k)}(\mu) = -\delta^{(k)}(\mu), \quad k = \overline{0, (n_2-1)} \quad (17)$$

(здесь через (k) обозначена производная k -го порядка).

Далее исследуем третью часть из (9), откуда следует, что $K_{\alpha+1}$ ($\alpha = n_1 + n_2$) является собственным вектором матрицы $U(0)$, а $\lambda=0$ - корнем кратности n_3 для $|U(0) - \lambda E|$.

Нетрудно видеть из вышеизложенного, что характеристический многочлен матрицы $U(0)$ имеет вид

$$|U(0) - \lambda E| = \delta(\lambda) + p_1(0)q_1\delta_1(\lambda) + p_2(0)q_2\delta_2(\lambda) + \dots + p_n(0)q_n\delta_n(\lambda). \quad (18)$$

Дифференцируя (18) n_3-1 раз и подставляя туда $\lambda=0$, по пятому условию задачи получим следующую подсистему из n_3 уравнений относительно $q_1, q_2, \dots, q_n$:

$$\sum_{j=1}^n p_j(0) q_j \delta_j^{(k)}(0) = -\delta^{(k)}(0), \quad k = \overline{0, (n_3-1)}. \quad (19)$$

Наконец, перейдем к определению $q_1, q_2, \dots, q_n$. Объединяя подсистемы (15), (17) и (19), получаем следующую систему из n уравнений относительно $q_1, q_2, \dots, q_n$ [5]:

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^n p_j(\lambda_i) \delta_j(\lambda_i) q_j = -\delta(\lambda_i), & i = \overline{1, n_1}, \\ \sum_{j=1}^n p_j(\mu) q_j \delta_j^{(k)}(\mu) = -\delta^{(k)}(\mu), & k = \overline{0, (n_2-1)}, \\ \sum_{j=1}^n p_j(0) q_j \delta_j^{(k)}(0) = -\delta^{(k)}(0), & k = \overline{0, (n_3-1)}. \end{cases} \quad (20)$$

Обозначим

$$F = \begin{bmatrix} p_1(\lambda_1) \delta_1(\lambda_1) & p_2(\lambda_1) \delta_2(\lambda_1) & \dots & p_n(\lambda_1) \delta_n(\lambda_1) \\ p_1(\lambda_2) \delta_1(\lambda_2) & p_2(\lambda_2) \delta_2(\lambda_2) & \dots & p_n(\lambda_2) \delta_n(\lambda_2) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ p_1(\lambda_{n_1}) \delta_1(\lambda_{n_1}) & p_2(\lambda_{n_1}) \delta_2(\lambda_{n_1}) & \dots & p_n(\lambda_{n_1}) \delta_n(\lambda_{n_1}) \\ p_1(\mu) \delta_1(\mu) & p_2(\mu) \delta_2(\mu) & \dots & p_n(\mu) \delta_n(\mu) \\ p_1(\mu) \delta'_1(\mu) & p_2(\mu) \delta'_2(\mu) & \dots & p_n(\mu) \delta'_n(\mu) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ p_1(\mu) \delta_1^{(n_2-1)}(\mu) & p_2(\mu) \delta_2^{(n_2-1)}(\mu) & \dots & p_n(\mu) \delta_n^{(n_2-1)}(\mu) \\ p_1(0) \delta_1(0) & p_2(0) \delta_2(0) & \dots & p_n(0) \delta_n(0) \\ p_1(0) \delta'_1(0) & p_1(0) \delta'_2(0) & \dots & p_n(0) \delta'_n(0) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ p_1(0) \delta_1^{(n_3-1)}(0) & p_2(0) \delta_2^{(n_3-1)}(0) & \dots & p_n(0) \delta_n^{(n_3-1)}(0) \end{bmatrix}_{n \times n}, \quad f = \begin{bmatrix} \delta(\lambda_1) \\ \delta(\lambda_2) \\ \dots \\ \dots \\ \delta(\lambda_{n_1}) \\ \delta(\mu) \\ \delta'(\mu) \\ \dots \\ \dots \\ \delta^{(n_2-1)}(\mu) \\ \delta(0) \\ \delta'(0) \\ \dots \\ \dots \\ \delta^{(n_3-1)}(0) \end{bmatrix}. \quad (21)$$

По (21) система (20) запишется в виде

$$F(q_1, q_2, \dots, q_n)^T = -f. \quad (22)$$

Нетрудно видеть, что матрица F благодаря условиям задачи невырожденная. Поэтому из (22) находим

$$q = (q_1, q_2, \dots, q_n) = -(F^{-1}f)^T.$$

Тогда по (4) окончательно получим

$$b = (b_1, b_2, \dots, b_n) = -(F^{-1}f)^T \Omega. \quad (23)$$

Наконец, согласно (2), (5), (6), (7) находим решение системы (1):

$$x = \Omega K \chi(t) e^{At} C,$$

где C – столбец из произвольных постоянных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Абгарян К.А.** Матричные и асимптотические методы в теории линейных систем. – М.: Наука, 1973.-431с.
2. **Гальперин Е.А.** Синтез линейных управлений в стационарной линейной системе // Изв.АН СССР. Техническая кибернетика. - 1968.- 14.-С.130-136.
3. **Гантмахер Ф.Р.** Теория матриц.- М.: Наука, 1967.- 576 с.
4. **Ройтенберг Я.Н.** Автоматическое управление. – М.: Наука, 1971.-395 с.
5. **Григорян Ф.П.** О построении управления с желаемым спектром в САР // Изв. НАН Армении. Механика.- 2003. - Т. 55, ¹ 2.-С. 59 - 69.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 09.06.2004.

Ֆ.Պ. ԳՐԻԳՈՐՅԱՆ

ՆԱԽՈՐՈՔ ՏՐՎԱԾ ՏԱՐԴԱԿԱՏԿԵՐՈՎ ԲԱԶՄԱՉԱՓ ԿԱՌԱՎԱՐՄԱՆ ՄԻՆԹԵԶԸ

Դիտարկվել է նախօրոք տրված ընդհանուր տեսքի տարրապատկերով բազմաչափ կառավարման սինթեզի խնդիրը ստացիոնար ինտեգրո-դիֆերենցիալ հավասարումների համակարգերում: Ստացվել է կարգավորչի մուտքային ազդանշանի և նախօրոք տրված տարրապատկերի միջև կապն արտացոլող առնչություն:

Առանցքային բառեր. կառավարման համադրում, ցանկալի տարրապատկեր, բազմաչափ կառավարում, իմպուլսային անցումային ֆունկցիա, փոխանցումային ֆունկցիա:

F.P. GRIGORYAN

MULTIVARIABLE CONTROL SYNTHESIS WITH IN ADVANCE GIVEN SPECTRUM

The problem of multivariable control choice synthesis in advance given spectrum of common view in stationary integro-differential equation system is considered. The formula expressing dependence between the coefficient of the input controller signal and in advance given spectrum is obtained.

Keywords: control synthesis, desirable spectrum, multivariable control, pulse transition functions, transferring function.

R. PAICHUK

**MODELLING SYSTEM RELIABILITY OF
FAULT-TOLERANT SYSTEMS WITH THE
SEMI-MARKOV STATE SPACE APPROACH**

Fault-tolerant systems can be analyzed by Markov state space approach but for more sophisticated and large systems, there should be some other means to estimate the system parameters. Here we extend the Bounding Theorem, we use it in software developments of ultrareliable computer systems to Fire & Gas systems which is a new approach in their safety parameter calculations.

Keywords: state-space, fault-tolerant, reliability, mean, variance.

Introduction. Traditionally, the reliability analysis of a complex system has been accomplished with combinatorial mathematics. The standard fault-tree method of reliability analysis is based on such mathematics. Unfortunately, the fault-tree approach is incapable of analyzing systems in which reconfiguration is possible. Basically, a fault tree can be used to model a system with :

1. Only permanent faults (no transient or intermittent).
2. No reconfiguration.
3. No time or sequence failure dependencies.
4. No state-dependent behavior.

Because fault trees are easier to solve than Markov models, fault trees should be used wherever these fundamental assumptions are not violated.

In reconfigurable systems the critical factor often becomes the effectiveness of the dynamic reconfiguration process. It is necessary to model such systems by using more powerful Markov modelling technique. A Markov process is a stochastic process whose behavior depends only upon the current state of the system. Markov state-space models have four main categories:

1. Discrete space and discrete time.
2. Discrete space and continuous time.
3. Continuous space and discrete time.
4. Continuous space and continuous time.

The second category is the one most useful for modelling fault-tolerant systems. Only models that contain a finite number of states will be used. However, the transition time between the states is not discrete and can take on any real value.

Reliability Modelling. The first step in modelling a system with a discrete space and continuous-time Markov model is to represent the state of the system with a vector of attributes that change over time. These attributes are typically system characteristics such as the number of working processors, the number of spare units or the number of faulty units that have not been removed. The more attributes in the model, the more complex the model, thus, the smallest set of

attributes that can accurately describe the fault-tolerant behavior of the system is typically chosen. The next step in the modelling process is to characterize the transition time from one state to another. Because this transition time is rarely deterministic, they are described by a probability distribution.

Typically, the transitions of a fault-tolerant system model fall into two categories; slow failure and fast recovery transitions. We will start modelling with two major types of systems; no reconfigurable and configurable systems.

Let T be a random variable representing the time to failure of the system. Next, we have to define a distribution for T , say $F(t)$. typically electronic component and consequently systems are assumed to fail according to exponential distribution [1]:

$$F(t) = \text{Prob}[T < t] = 1 - e^{-\lambda t}.$$

Then the important concept in reliability modelling the hazard rate, $h(t)$ is defined as:

$$h(t) = F'(t) / [1 - F(t)] = \lambda,$$

which is the failure rate itself. The exponential distribution is the only distribution with a constant hazard rate. The Markov model representing this system is as follows.

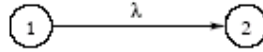


Fig. 1. Model of simplex system

In this Markov model, state 1 represents the operational state in which our system works, state 2 represents the system failure state in which the simplex system has failed, and the transition from state 1 to state 2 represents the occurrence of the failure.

For reliability modelling purposes, electronic components are generally assumed to fail according to the exponential distribution. Some handbooks offer a more complete discussion on the problem of estimating the reliability of electronic components. Once the reliability of each component in a system is known, the failure rate of the system is simply the sum of the failure rates of the individual components.

For example, suppose $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ represent the failure rates of the components, letting T be a random variable representing the time of failure of the system and T_i , $i=1,2,\dots,n$, representing the time of the i th component of failure, the distribution of failure for the system $F_c(t)$ is determined as follows [2]:

$$\begin{aligned} F_c(t) &= \text{Prob}[T < t] = \\ &= \text{Prob}[\min\{T_1, T_2, \dots, T_n\} < t] = \\ &= 1 - \text{Prob}[T_1 > t, T_2 > t, \dots, T_n > t]. \end{aligned}$$

And if we assume that the components fail independently, then :

$$\begin{aligned}
F_c(t) &= 1 - \prod_{i=1}^n \text{Prob}[T_i > t] = \\
&= 1 - \prod_{i=1}^n \exp(-\lambda_i t) = \\
&= 1 - \exp\left(-\sum_{i=1}^n \lambda_i t\right),
\end{aligned}$$

which is an exponential distribution with failure rate :

$$\lambda = \sum_{i=1}^n \lambda_i$$

Modelling Static Redundant Systems. The triple modular redundant (TMR) is one of the simplest fault tolerant architectures and the more sophisticated model of this kind which can be called NMR (N modular redundant). The computers are assumed to be physically isolated, so that a failed computer cannot affect another working computer. This means that they are assumed to fail independently.

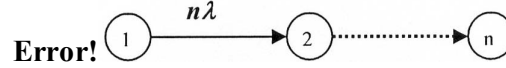


Fig. 2. Model of NMR System

The solution of the Markov model is conceptually simple, although the details can be cumbersome. The n -state Markov model leads to a system of n -coupled differential equations. These equations may simply be represented with the vector notation. Let $\mathbf{P}(t)$ be a vector that gives the probability of being in each state at time t . The n -state Markov model in Figure 2 [3] is

$$\mathbf{P}(t) = [P_1(t), P_2(t), \dots, P_n(t)].$$

The system of differential equations is given by :

$$\mathbf{P}'(t) = \mathbf{P}(t)\mathbf{A},$$

where

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -n\lambda & n\lambda & \dots & \dots & 0 \\ 0 & -(n-1)\lambda & (n-1)\lambda & \dots & 0 \\ 0 & & -(n-2)\lambda & & \\ \vdots & & & \ddots & (n-1)\lambda \\ 0 & & & & 0 \end{bmatrix}.$$

The matrix A is easily constructed by thinking of the Markov model in terms of flow in and flow out. You can begin with the off-diagonal components. As there is a transition from state 1 to state 2 the entry at a_{12} is nonzero, and the value of a_{12} is the transition rate $n\lambda$. The diagonal entries are obtained by summing all non-diagonal entries on the same row and negating it. The solution will be :

$$P(t) = P(0)e^{At},$$

where

$$P(0) = [1, 0, 0]$$

is the initial state probability and the system begins in a fault free state. If the model is changed in Figure 3, then the matrix A becomes:

$$A = \begin{bmatrix} -n\lambda & n\lambda & \cdots & \cdots & 0 \\ \alpha & -(n-1)\lambda - \alpha & (n-1)\lambda & \cdots & 0 \\ 0 & & -(n-2)\lambda & & \\ \vdots & & & \ddots & \\ 0 & & & & 0 \end{bmatrix}.$$

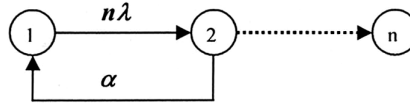


Fig. 3. Altered model

The probability of NMR system failure as a function of mission time and also as a function of N is given in Figures 4 and 5.

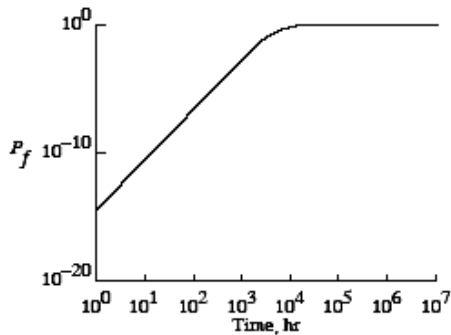


Fig. 4. As a function of mission time

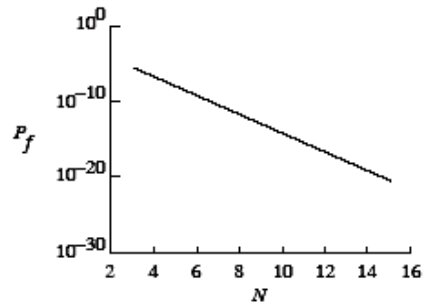


Fig. 5. As a function of N

Modelling Reconfigurable Systems. Fault tolerant systems are often designed by using a strategy of reconfiguration. Reconfiguration strategies come in many varieties, but always involve the logical or physical removal of a faulty component. Two basic reconfiguration strategies occur—degradation and replacements with spares. The degradation method involves the permanent removal of a faulty component without replacement. The reconfigured system continues with reduced set of components. The replacement with spares method involves both the removal of faulty components and their replacement with a spare.

Reliability Analysis Programs. Some reliability analysis programs have been developed for ultra reliable computer/electronic system architectures. These methods provide an efficient means for computing accurate upper and lower bounds for the state probabilities of a large class of semi-Markov models. These programs distinguish between fast and slow transitions. If the mean transition time μ is small with respect to the mission time T , that is $\mu < T$, then the transition is fast, otherwise it is slow. The mathematics on which these reliability analysis programs are based is called "Bounding Theorem".

Path-Step Classification & Notation. The theorem provides bound on the death state probabilities at a specified time. It is assumed that the system is initially in a single state that is $P(o) = 1$. The programs find every path from the start state to a death state. The contribution of each path to system failure is calculated separately by using the semi-Markov bounding theorem of white.

Each state along the path can be classified into one of there classes that are distinguished by the type of transitions leaving the state. A state and all transitions leaving it will be referred to as a "path step". The transition on the path that is currently being analyzed will be referred to as a "path step". The transition on the path that is currently being analyzed will be referred to as the "on-path transition".

The remaining transitions will be referred to as the "off-path transitions". The classification is made on the basis of whether on-path and off-path transitions are slow or fast [4].

Class I path step ; Slow on path, slow off path . If all transitions leaving the state are slow, then the path step is class 1. The rate of on-path exponential transition is λ_i . (see fig 6).

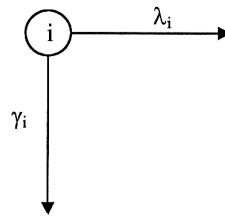


Fig. 6. Class I path step

An arbitrary number of slow off-path transitions can occur and the sum of their exponential transition rates is λ_i .

Class 2 path step ; Fast on path, arbitrary off path . If the on-path transition is fast, the path step is class 2. An arbitrary number of slow or fast off-path transitions may exist. As before, the slow off-path, exponential transitions can be represented as a single transition with a rate equal to the sum of all the slow off-path transitional rates. The distribution of the fast on-path transition is $F_{i,1}$.

The distributions of time for the k th fast transition from state i is referred to as $F_{i,k}$ (the probability that the next transition out of state i goes into state k and occurs within time t is $F_{i,k}$) . Three measurable parameters must be specified for each fast transition. The transition probability $\rho(F_{i,k}^*)$, the conditional mean $\mu(F_{i,k}^*)$, and the variance $\sigma^2(F_{i,k}^*)$, given that this transition occurs. The asterisk is used to note that the parameters are defined in terms of the conditional distributions combined with definition.

Mathematically, these parameters are defined as follows:

$$\rho(F_{i,k}^*) = \int_0^\infty \prod_{j \neq k} [1 - F_{i,j}(t)] dF_{i,k}(t),$$

$$\mu(F_{i,k}^*) = \frac{1}{\rho(F_{i,k}^*)} \int_0^\infty t \prod_{j \neq k} [1 - F_{i,j}(t)] dF_{i,k}(t),$$

$$\sigma^2(F_{i,k}^*) = \frac{1}{\rho(F_{i,k}^*)} \int_0^\infty t^2 \prod_{j \neq k} [1 - F_{i,j}(t)] dF_{i,k}(t) - \mu^2(F_{i,k}^*).$$

Experimentally, these parameters correspond to the fraction of times that a fast transition is successful and the mean and the variance of the conditional distribution given that the transition occurs.

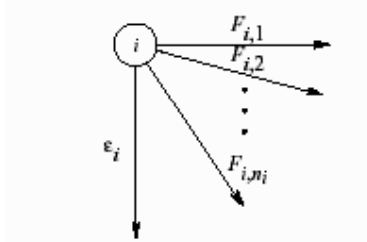


Fig. 7. Class 2 path step . Fast on path, arbitrary off path

Note, in any experiment where competing processes in a system are studied, the observed empirical distributions will be conditional. The time it takes a system to transition to the next state will only be observed when that transition occurs. These expressions are defined independently of the exponential transitions ε_j .

Consequently, the sum of the fast transition probabilities $\sum \rho(F_{i,k}^*)$ must be 1. In particular, if only one fast transition occurs, its probability is 1 and the conditional mean is equivalent to the unconditional mean. (The user does not have to deal explicitly with the unconditional distributions $F_{i,k}$. However, to develop the mathematical theory, the distribution must be used)

Class 3 path step : slow on path, fast off path. The on-path transition must be slow for a path step to be categorized as class 3. Both slow and fast off-path transitions can exist; however, at least one off-path transition must be fast (see Fig.7). The path step 2 → 3 in the model of the triad plus one spare shown in Figure 8 are in this class. The slow on-path transition rate is α_j . The sum of the slow off-path transition rates is β_j . As in class2, the transition probability $\rho(G_{j,k}^*)$, the conditional mean $\mu(G_{j,k}^*)$, and the conditional variance $\sigma^2(G_{j,k}^*)$ must be given for each fast off-path transition with distribution $G_{j,k}$. Two letters are used to help track whether the transition is a class 2 (labeled F) or class 3 (labelled G) in the current path.

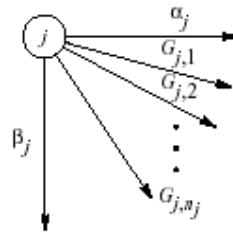


Fig. 8. Class 3 path step. Slow on path, fast off path

In either case, the analyst supplies the conditional mean, the conditional standard deviation, and the transition probability. Although, the parameters described above suffice to specify a class 3 path step, the mathematical theory is more easily expressed in terms of the holding time in a state. It is the time the system remains in the state before it transitions to some other state. The bounding theorem is expressed by using a slightly different holding time, which will be referred to as "recovery holding time" to prevent confusion. The recovery holding time is the holding time in the state with the slow exponential distributions removed. Because the slow exponential transitions occur at a rate many orders of magnitude less than the fast transitions, the recovery holding time is approximately equal to the traditional holding time. Let H_j represent the distribution of the recovery holding time in state j :

$$H_j(t) = 1 - \prod_{k=1}^{n_j} [1 - G_{j,k}(t)] .$$

Then the following parameters are used in the theorem :

$$\mu(H_j) = \int_0^\infty \prod_{k=1}^{n_j} [1 - G_{j,k}(t)] dt,$$

$$\sigma^2(H_j) = 2 \int_0^\infty t \prod_{k=1}^{n_j} [1 - G_{j,k}(t)] dt - \mu^2(H_j).$$

These parameters are the mean and the variance of the holding time in state j without consideration for slow exponential transitions (i.e., with the slow exponential transition removed). These parameters do not have to be supplied to the programs. The program derives these parameters from the other available inputs, such as $\rho(G_{j,k}^*)$, $\mu(G_{j,k}^*)$, and $\sigma^2(G_{j,k}^*)$, as follows [4]:

$$\mu(H_j) = \sum_{k=1}^{n_j} \rho(G_{j,k}^*) \mu(G_{j,k}^*),$$

$$\sigma^2(H_j) = \left\{ \sum_{k=1}^{n_j} \rho(G_{j,k}^*) [\sigma^2(G_{j,k}^*) + (\mu^2(G_{j,k}^*))] \right\} - \mu^2(H_j).$$

The parameters $\rho(G_{j,k}^*)$, $\mu(G_{j,k}^*)$, and $\sigma^2(G_{j,k}^*)$ are defined exactly as the class 2 path step parameters.

Although the fast distributions are specified without consideration of the competing slow exponential transitions, the theorem gives bounds that are correct in the presence of such exponential transitions. The parameters were defined in this manner to simplify the process of specifying a model. throughout the paper, the holding time in a state in which the slow transitions have been removed will be referred to as "recovery holding time." For convenience, when referring to a specific path in the model, the distribution of a fast on-path transition will be indicated by a single subscript that specified the source stat. For example, if the transition with distribution $F_{j,k}$ is the on-path transition from state j , then it can be referred to as F_j , where $F_{j,k}$ is the k th fast transition from state j and F_j is the on-path fast transition from state j .

Let us formulate the result. Let $D(T)$ be the probability of entering a particular death state within the mission time T , following a path with k class1, m class 2 and n class 3 path steps.

$$LB < D(T) < UB,$$

where

$$UB = Q(T) \prod_{i=1}^m \rho(F_i^*) \prod_{j=1}^n \alpha_j \mu(H_j),$$

$$LB = Q(T - \Delta) \prod_{i=1}^m \rho(F_i^*) \left[1 - \varepsilon_i \mu(F_i^*) - \frac{\mu^2(F_i^*) + \sigma^2(F_i^*)}{r_i^2} \right] \times$$

$$\times \prod_{j=1}^n a_j \left\{ \mu(H_j) - \frac{(a_j + \beta_j) [\mu^2(H_j) + \sigma^2(H_j)]}{2} - \frac{\mu^2(H_j) + \sigma^2(H_j)}{s_j} \right\}$$

for all $r_j, s_j > 0$ with $\Delta = r_1 + r_2 \dots + r_n + s_1 + s_2 \dots + s_n$ and $Q(T)$ = the probability of traversing a path consisting of only the class 1 path steps within time T .

The theorem is true of any $r_j > 0$ and $s_j > 0$ provided that $\Delta < T$. Different choices of these parameters will lead to different bounds. The SURE program uses the following values of r_j and s_j :

$$r_i = \{2T[\mu^2(F_i^*) + \sigma^2(F_i^*)]\}^{1/3},$$

$$s_j = \left\{ T \left[\frac{\mu^2(H_j) + \sigma^2(H_j)}{\mu(H_j)} \right] \right\}^{1/2}.$$

These values have been found to give very close bounds in practice and are usually very near the optimal choice [1].

Two simple algebraic approximations for $Q(T)$ were given. One approximation overestimates and one approximation underestimates, and are given respectively as

$$Q(T) < Q_u(T) = \frac{\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \dots \lambda_k T^k}{kl}, \quad Q(T) > Q_l(T) = Q_u(T) \left[1 - \frac{T}{k+1} \sum_{i=1}^k (\lambda_i + \gamma_i) \right].$$

Both $Q_u(T)$ and $Q_l(T)$ are close to $Q(T)$ as long as $\sum_{i=1}^k (\lambda_i + \gamma_i) T$ is small, that is, as long as the mission time is short compared with the average lifetime of the components. Some programs use the following slightly improved upper bound on $Q(T)$ [4]:

$$Q(T) < Q_u^*(T) = \frac{1}{|S|!} \prod_{i \in S} (\lambda_i T),$$

where

$$S = \{i \mid \lambda_i T < 1\}.$$

This bound is obtained by removing all the fast exponential transitions from the $Q(T)$ model. Because the path is short, the probability of reaching the death state is larger than that of the original $Q(T)$ model.

REFERENCES

1. **Beasley, Michael.** Reliability for Engineers. - McMillan, 1991.- 262 p.
2. "Reliability" Lecture 29, Engs 27-Discrete and Probabilistic Systems. Winter, 2003. – 42 p.
3. **Roush L. Marvin, Webb M.** Willie Applied Reliability Engineering. - Center for Reliability Engineering, The University of Maryland, 1998. – 535 p.
4. **Butler W. R., Johnson C. Sally.** Techniques for Modelling the Reliability of Fault-Tolerant Systems with the Markov State-Space Approach, 1995. – 125 p.

SEUA. The material is received on 15.02.2006.

Ը. ՓԱՅՉՈՒՎ

ԽԱՓԱՆՈՒՄՆԵՐԻ ՆԿԱՏՄԱՍԲ ԴԻՄԱՑԿՈՒՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳԵՐԻ ՀՈՒՍԱԼԻՈՒԹՅԱՆ ՍՈՂԵԼԱՎՈՐՈՒՄԸ ԿԻՄԱՄԱՐԿՆԳՅԱՆ ՎԻՃԱԿՆԵՐԻ ՏԱՐԱԾՈՒԹՅԱՆ ՕԳՏԱԳՈՐԾՄԱՍԲ

Խափանումների նկատմամբ դիմացկուն համակարգերը կարող են վերլուծվել Մարկովյան վիճակների տարածության օգտագործմամբ, սակայն, երբ համակարգերը բավականաչափ բարդ են, անհրաժեշտ է օգտագործել այլ եղանակներ՝ վերջիններիս պարամետրերը հաշվարկելու նպատակով: Հավանականությունների տեսության կենտրոնական սահմանային թեորեմի հիման վրա մշակված մոտեցումը, որը [4] աշխատանքում օգտագործվել է գերբարձր հուսալիությամբ օժտված քոմպյուտերային համակարգերի ծրագրային ապահովումների մշակման ժամանակ, ներկա աշխատանքում տարածվում է հակահրդեհային հուսալիության պարամետրերի գնահատման բնագավառի վրա:

Առանցքային բառեր. վիճակների տարածություն, խափանումանդիմացկուն, հուսալիություն, միջին արժեք, դիսպերսիա:

Р. ПАЙЧУК

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ ТОЛЕРАНТНЫХ ОТНОСИТЕЛЬНО ОТКАЗОВ СИСТЕМ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПОЛУМАРКОВСКИХ ПРОСТРАНСТВ СОСТОЯНИЙ

Толерантные относительно отказов системы могут быть исследованы на основе применения полумарковских пространств состояний. Однако в случаях, когда системы достаточно сложны, необходимо воспользоваться другими методами с целью вычисления параметров таких систем. Подход, разработанный на основе центральной предельной теоремы теории вероятностей и примененный в [4] при разработке программного обеспечения компьютерных систем, в настоящей работе распространяется на область оценивания параметров надежности противопожарных систем.

Ключевые слова: пространство состояний, толерантный относительно отказов, надежность, среднее значение, дисперсия.

Ռ.Ս. ԱՅՎԱԶՅԱՆ, Ա.Ռ. ԱՅՎԱԶՅԱՆ

ՆԵՐՔԻՆ ԱՅՐՄԱՆ ՇԱՐԺԻՉՆԵՐՈՒՄ /ՆԱՇ/ ԻՆԴԻԿԱՏՈՐԱՅԻՆ ԱՇԽԱՏԱՆՔԻ ԹԵՐՈԳՏԱԳՈՐԾՄԱՆ ԳՈՐԾԱԿԻՑԸ

Շարժիչների ինդիկատորային ցուցանիշների գնահատման համար առաջարկվում է նոր չափանիշ՝ ինդիկատորային աշխատանքի թերօգտագործման գործակիցը: Այդ գործակիցի որոշումը նպատակահարմար է իրագործել ըստ բեռնվածության գրաֆիկի, որը կառուցվում է «միջին արդյունավետ ճնշում – վառելիքալարվածություն» կոորդինատային համակարգում:

Առանցքային բառեր. ներքին այրման շարժիչներ, ինդիկատորային աշխատանք, թերօգտագործման գործակից, վառելիքալարվածություն:

ՆԱՇ-երի արդյունավետ ցուցանիշների լավացման եղանակներից են դրանցում մեխանիկական կորուստների նվազեցման հաշվին հզորության բարձրացումը և խնայողականության լավացումը:

Ժամանակակից շարժիչներում նոր կոմպոզիցիոն նյութերի, բարձրորակ յուղերի և հատուկ հավելանյութերի օգտագործումը մեծ հեռանկարներ են բացում շարժիչների արդյունավետ ցուցանիշների հետագա լավացման համար: Ելնելով դրանից՝ անհրաժեշտ է մշակել մի այնպիսի չափանիշ, որը շարժիչի ինդիկատորային աշխատանքի միջոցով հնարավորություն կտա գնահատել այդ ցուցանիշների մեծացումը ի հաշիվ մեխանիկական կորուստների վրա ծախսվող աշխատանքի նվազման:

Դիտարկենք շարժիչի բեռնվածության բնութագրի [1]

$$P_e = cK_T \eta_i - P_{M\Gamma}$$

հավասարումը, որտեղ P_e -ն միջին արդյունավետ ճնշումն է, C -ն՝ հաստատուն մեծություն, որը հավասար է ջերմության մեխանիկական համարժեքի և վառելանյութի ջերմատվության արտադրյալին (AxH_u), K_T - ն վառելիքալարվածությունն է, որը վառելիքի տեսակարար ծախսն է (q/ul^3), $P_{M\Gamma}$ - ն՝ մեխանիկական կորուստների միջին ճնշումը:

Նկատի ունենալով, որ միջին ինդիկատորային ճնշումը՝

$$P_i = P_e + P_{M\Gamma}, \quad (1)$$

կստանանք՝ $P_i = c\eta_i K_T$, իսկ ինդիկատորային օ.գ.գ.-ն կորոշվի $\eta_i = P_i / cK_T$ արտահայտությամբ:

(1) հավասարումը ներկայացնենք հետևյալ տեսքով.

$$P_e / P_i = 1 - P_{M\Gamma} / P_i = \eta_m:$$

$P_{M\Gamma}/P_i$ հարաբերությունն անվանենք ինդիկատորային աշխատանքի թերօգտագործման գործակից՝ $\sigma = P_{M\Gamma} / P_i$:

P_e - K_T կոորդինատային համակարգում բեռնվածության գրաֆիկի ցանկացած ղիրքում x կետի համար (նկ.1) կարող ենք գրել՝ $\sigma = K_{Txx} / K_{Tx}$:

Այսպիսով, K_{Tx} ռեժիմի համար ինդիկատորային աշխատանքի թերօգտագործման գործակիցն անմիջականորեն կարելի է ստանալ $P_e - K_T$ կոորդինատային համակարգում կառուցված բեռնվածության բնութագրից, որի արդյունքում՝ նաև շարժիչի մեխանիկական օ.գ.գ.-ն՝ $\eta_m = 1 - \sigma$:

Դիտարկենք σ -ի ազդեցության հիմնական դեպքերը. նկ.1-ից ակնհայտ է, որ σ -ի վրա կարելի է ազդել երկու ուղիով՝ մեխանիկական կորուստների կամ ինդիկատորային օ.գ.գ.-ի փոփոխությամբ: Եթե $\eta_i = \text{const}$ դեպքում փոքրացվի $P_{\text{վտ}}$ -ն, ասենք՝ օգտագործելով ցածր մածուցիկությամբ յուղ կամ համապատասխան հավելանյութ, ապա բնութագրի ուղղագիծ մասն իր նախնական դիրքից $P_{\text{մփxx2}} - P_{\text{մփxx1}} = \Delta P_{\text{մփxx}}$ մեծությամբ զուգահեռ կտեղափոխվի դեպի վեր: Այս դեպքում $I_{\text{ս2}}/I_{\text{ս1}}$ հարաբերությունը կփոքրանա, որը կհանգեցնի մեխանիկական օ.գ.գ.-ի աճին և, հետևաբար, շարժիչի արդյունավետ և խնայողական աշխատանքին:

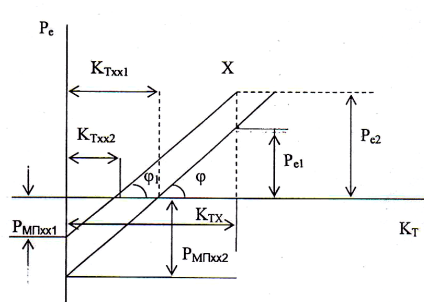
Նկ.2-ում պատկերված է այն դեպքը, երբ փոխվում է ինդիկատորային օ.գ.գ.-ն ($P_{\text{վտ}} = \text{const}$): Այստեղ σ -ն նույնպես մեծանում է P_i -ի մեծացմանը զուգընթաց, ինչը հանգեցնում է մեխանիկական օ.գ.գ.-ի մեծացմանը: K_{Tx} -ի փոքրացումը, երբ $P_{\text{վտ}} = \text{const}$, բացատրվում է այրման գործընթացի լավացմամբ: Գործնականում η_i -ի փոփոխությունն ուղեկցվում է $P_{\text{վտ}}$ -ի փոփոխությամբ [2]: Ավելի վաղ սահմանել ենք, որ մեխանիկական և ջերմային կորուստներն օրգանապես կապված են միմյաց հետ: Նոր շարժիչների աշխատանքային գործընթացի չափաբերման ժամանակ ինդիկատորային օ.գ.գ.-ի մեծացմանը հասնում են խառնուրդագոյացման ամենաշահավետ ինտենսիվության ընտրությամբ: Հայտնի է, որ օդի մրրկացման ուժգնացումը փականների տակ որոշակի սահմաններում հանգեցնում է խառնուրդագոյացման լավացմանը և հետևաբար՝ η_e -ի աճին (P_i -ն նույնպես), որը կապված է լրացուցիչ ծախսերի հետ՝ պայմանավորված ջերմափոխանակման վրա մեխանիկական կորուստների չափաբաժնի մեծացմամբ:

Նշվածը ակնհայտ է մեխանիկական կորուստների մեծացման հաշվին (նկ.3) P_i -ի բարձրացման ընդհանուր դեպքից: Այստեղ $P_e = f(K_T)$ կորի 1-ին դիրքից 2-րդին անցնելիս մեծանում են P_i և $P_{\text{վտ}}$ միջին ճնշումները:

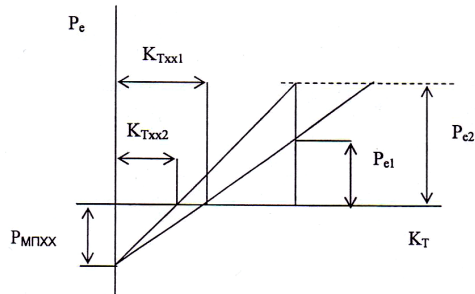
$P_e = f(K_T)$ կորի յուրաքանչյուր դիրք բնութագրվում է իր σ գործակցով: Այդ դեպքում խնայողականության տեսակետից շահավետությունը որոշվում է համապատասխան ինդիկատորային աշխատանքի թերօգտագործման գործակիցների σ_1 / σ_2 հարաբերությամբ:

Եթե այդ հարաբերությունը մեծ է մեկից, ապա այդպիսի փոփոխությունը խնայողականության տեսակետից արդարացված է:

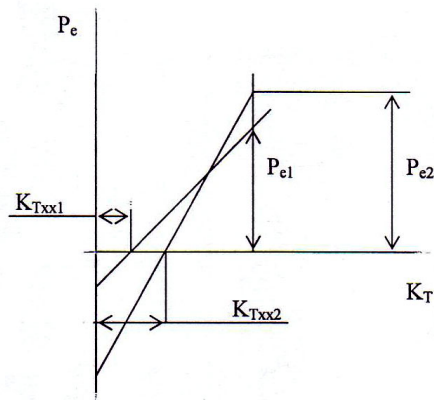
σ_1, σ_2 մեծությունները կարելի է արտահայտել համապատասխան պարապ ընթացքի և X կետում վռելիքալարվածության հարաբերությամբ (նկ.3), այսինքն՝ $\sigma_1 = K_{\text{Txx1}} / K_{\text{Tx}}$, իսկ $\sigma_2 = K_{\text{Txx2}} / K_{\text{Tx}}$, որտեղից էլ՝ $\sigma_1 / \sigma_2 = K_{\text{Txx1}} / K_{\text{Txx2}}$:



Նկ. 1



Նկ. 2



Նկ.3

Այսպիսով, խնայողության տեսակետից $P_e = f(K_T)$ կորի տեղաշարժն արդարացվում է, երբ $K_{Txx2} < K_{Txx1}$: Մյուս դեպքում, երբ η_i -ի մեծացումը մեխանիկական կորուստների լրացուցիչ մեծությամբ է պայմանավորված, տնտեսապես չի արդարացվում $K_{Txx2} / K_{Txx1} < 1$ -ը հարաբերությունը: Սակայն գործնականում հաճախ այդ խնդիրները լուծվում են ոչ միայն խնայողության, այլև արդյունավետ հզորության տեսակետից: Այս պարագայում հարցը լուծվում է թե խնայողության, թե արդյունավետության տեսանկյունից:

Ուրեմն, ինդիկատորային օ.գ.գ. η_i -ի բարձրացման շահավետ խնայողականության չափանիշը մեխանիկական միջին կորուստների ճնշման հաշվին համարվում է $\sigma_1 = K_{Txx} / K_{Tx}$ հարաբերությունը:

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. **Мкртумян Э. А., Айвазян Р.С.** Определение индикаторного КПД дизеля по нагрузочной характеристике // Известия АН АрмССР. Сер. ТН.-1973. – Т.26, ¹ 12. – С. 48-53.
2. Двигатели внутреннего сгорания. Теория ПКД / Под ред. **А.С. Орлина, М.Г. Круглова.** – М., 1983.
3. **Колчин А. И., Демидов В.П.** Расчет автомобильных и тракторных двигателей. – М.: 2003.

ՀՊՃՀ: Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 21.04.2004:

Р.С. АЙВАЗЯН., А.Р. АЙВАЗЯН

КОЭФФИЦИЕНТ НЕДОИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИНДИКАТОРНОЙ РАБОТЫ ДВС

Для оценки индикаторных показателей двигателей предлагается использовать коэффициент недоиспользования индикаторной работы. Определение этого коэффициента целесообразно осуществлять по нагрузочной характеристике, построенной в системе координат “среднее эффективное давление - топливнонапряженность”.

Ключевые слова: двигатели внутреннего сгорания, индикаторная работа, коэффициент недоиспользования, топливнонапряженность.

R.S. AYVAZYAN, A.R. AYVAZYAN

UNDERUSED INDICATOR WORK COEFFICIENT OF INTERNAL COMBUSTION ENGINES (ICE)

To evaluate the indicator features of the ICE (engines), the coefficient of underused indicator work is proposed. It is expedient to realize the determination of this coefficient by loading characteristics built in the system of coordinates “mean effective pressure- fuel tension”.

Keywords: internal combustion engines, indicator operation, underuse coefficient, fuel tension.

Р.Г. ГЕВОРКЯН

**РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ НЕОДНОРОДНОСТИ РАЗРЯДА В ОЗОНАТОРАХ С
БАРЬЕРНЫМ РАЗРЯДОМ ПУТЕМ ИЗМЕНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ КАТОДА**

При работе озонаторов врачи, применяющие озон, сталкиваются с многочисленными техническими проблемами, которые в основном связаны с неоднородностью разряда. Приведено решение проблемы неоднородности разряда в озонаторах путем нанесения регулярных микрорельефов на поверхность катода, что обеспечивает прирост выхода озона на 30...35%, равномерный износ электрода и удлинение его срока службы.

Ключевые слова: озон, озонатор, электрод, поверхность катода, регулярные микрорельефы.

Введение. Из большого разнообразия современных конструкций генераторов озона (озонаторов), где озон образуется при помощи электрического разряда в воздухе или в кислороде, наибольшее распространение получили озонаторы с так называемым барьерным разрядом (разряд в узком газовом зазоре между плоскими или коаксиальными электродами, один из которых покрыт слоем твердого диэлектрика) [1]. В частности, такие озонаторы лежат в основе озонотерапии – широко развивающегося в последнее время направления медицины.

При работе озонаторов врачи, применяющие озон, сталкиваются с многочисленными техническими проблемами, но практика работы показывает, что большинство используемых в медицинской практике озонаторов имеют три основных недостатка:

- низкая точность поддержания заданной концентрации озона;
- низкий ресурс работы: уже через сто часов работы они допускают значительную ошибку в выдаваемой концентрации, что недопустимо, особенно при парентеральном применении озона;
- разряд на воздухе всегда образует некоторое количество ядовитых оксидов азота.

Решение этих проблем позволит более полно использовать уникальные свойства озона при лечении разнообразных болезней, а использование воздуха в качестве рабочего газа вместо кислорода даст возможность применять озонотерапию даже в полевых госпиталях.

Большинство исследователей в области барьерного разряда пришли к выводу, что основная причина вышеупомянутых проблем заключается в нарушении однородности барьерного разряда [2]. Установлено, что если разряд в озонаторе устойчиво однородный и параметры барьера (материал, его качество, геометрия и размеры барьера) подобраны правильно, то озонатор будет работать достаточно долго и концентрация озона будет постоянной или за время работы снизится незначительно.

В озонаторах трубчатого типа большое влияние на однородность разряда оказывают цилиндричность и соосность коаксиальных элементов, образующих разрядную камеру озонатора. Для устранения этих недостатков электроды приводят с высокой точностью в симметричное состояние (равноудаленность электрода и диэлектрика). Но даже такие трудоемкие процессы не всегда обеспечивают долгосрочные результаты и не гарантируют устойчивую работу озонаторов [3]. Использование новых материалов позволяет в определенной степени повысить надежность и ресурс озонаторных камер, но тем самым вопрос не решается кардинально.

Для решения проблемы неоднородности барьерного разряда в данной работе предлагается изменить поверхность электрода, на которой отсутствует диэлектрический барьер (предпочтительнее использовать катод), посредством нанесения регулярных микрорельефов – создания равных углублений на поверхности, в результате чего будут образовываться острия, находящиеся на равных расстояниях друг от друга.

Материалы и методы исследования. Для обоснования целесообразности использования электродов с измененной поверхностью эксперименты проводились на двух озонаторах, равных по своим геометрическим и электрическим характеристикам, отличие которых состояло лишь в том, что первый (контрольный) из них был оснащен обыкновенным гладким электродом, а второй – электродом, на поверхность которого были нанесены регулярные микрорельефы. В качестве диэлектрика служило кварцевое стекло, в качестве анода – алюминиевая фольга, а в качестве катода – трубка из нержавеющей стали.

Поскольку работа проводилась на озонаторах трубчатого типа, то микрорельефы наносились на внутреннюю поверхность трубки из нержавеющей стали посредством резки с шагом 0,1...0,2 мм.

Концентрация озона на выходе измерялась анализатором озона ЦИКЛОН 5-23. Электрические характеристики выводились на двулучевой запоминающий осциллограф С8-14. В качестве рабочего газа использовался воздух, подаваемый из компрессора.

Для визуальной оценки разряда использовался элемент, состоящий из плоских алюминиевых электродов, где на катод был нанесены регулярные микрорельефы со следующими характеристиками: глубина – 0,1...0,2 мм, расстояние между остриями – 0,1...0,2 мм. В качестве контрольного использовался электрод с неровной поверхностью (для неоднородности разряда).

Результаты и обсуждение. Экспериментально было показано, что в электродах с регулярными микрорельефами выход озона в среднем на 30...35% больше, а вольт-амперные характеристики двух испытуемых озонаторов (см. рис.) указывают в первую очередь на значительное снижение (на 40%) порогового значения напряжения на озонаторах, при котором начинается разряд.

В электродах с регулярными микрорельефами разряд значительно приближается к однородному, а микропорядки одной серии равномерно распределяются в разрядном промежутке. Это визуально наблюдается в плоских электродах.

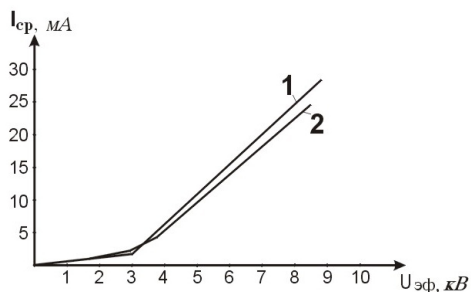


Рис. Вольт-амперная характеристика озонатора:
1 - электроды с гладкой поверхностью,
2 - электроды с регулярными микрорельефами

Регулярные микрорельефы вынуждают разряд появляться только на остриях микрорельефа, но поскольку их количество очень велико, то это приводит к равномерному распределению энергии по всей площади электрода. Также регулярные микрорельефы не позволяют катодному пятну увеличиваться в размерах.

Анализируя полученные результаты, приходим к выводу, что регулярные микрорельефы влияют на синтез озона в основном тремя способами.

1. Исходим из того, что даже на самых гладких поверхностях электрода со временем появляются микрорельефы. Это связано с продолжительным воздействием стримеров на поверхности, приводит к значительным термическим и механическим напряжениям, способным вызвать механические разрушения на поверхностях как электрода, так и барьера [1]. Таким разрушениям подвержены барьеры из стекла, стекломали, керамики, т.е. из хрупких материалов [4]. После таких локальных изменений (каверн) на поверхностях электрода и диэлектрика велика вероятность появления следующих разрядов в этом же месте, так как увеличивается градиент напряжения поля, связанного либо с большими отклонениями от соосности или параллельности элементов разрядных камер, либо с поверхностными искажениями поля как барьера, так и металлических электродов.

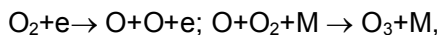
Изменение формы разряда (неоднородность разряда) характеризуется более высокими значениями тока, температуры, повышенными поперечными размерами канала, а также низкими значениями падения напряжения на разрядном промежутке.

Все эти факторы напрямую влияют на синтез озона. Известно, что в самом стримере озон не образуется, но за счет перегрева плазмы он образуется в околостримерном пространстве (диффузный разряд), т.е. чем больше зона диффузного разряда и выше повторяемость разряда в этой зоне, тем выше выход озона и неизменность его количества при других равных параметрах озонатора [5]. Поскольку в неоднородном разряде приложенная энергия распределяется между меньшим количеством стримеров, то и околостримерное пространство невелико, то есть озон синтезируется в меньшей степени. Вместе с тем перегрев плазмы ускоряет разложение озона и образование окислов азота, что недопустимо в медицине.

Регулярные микрорельефы обуславливают постепенный и равномерный износ электродов, что гарантирует постоянную концентрацию озона и длительную их службу. Вместе с тем в электродах с регулярными

микрорельефами количество стримеров на порядок больше. Поэтому тот же ток проходит с большим количеством стримеров, и, как следствие, меньше локальная температура в околостримерном пространстве, разложение озона и синтез окислов азота.

2. Известно, что синтез озона протекает по двум основным реакциям. В первой идет процесс диссоциации молекул кислорода при взаимодействии со свободным электроном, во второй – образование молекулы озона:



где М – третья частица: молекула, ион, электрон или атом в нейтральном или возбужденном состоянии [5].

Также известно, что затраты энергии на разрушение молекулы кислорода зависят от способа воздействия на связь. При термическом воздействии на связь она разрушается при энергии 5,13 эВ, а при механическом воздействии на связь достаточно затратить 2,56 эВ энергии. Поскольку диссоциация молекулы кислорода в озонаторе – механический, а не термический процесс, то в качестве энергии нужно принять 2,56 эВ. При этом энергия возбуждения одного из кислородных атомов до метастабильного состояния равна 1,96 эВ. Известно, что энергии ионизации для молекулы кислорода и азота равны, соответственно, 12,5 эВ и 14,5 эВ [3].

Так как автоэмиссия электронов при регулярных микрорельефах по всей площади происходит равномерно и с меньшим напряжением, энергия электронов мала, в начальный период в общей группе электронов преобладают так называемые "холодные электроны", что приводит к интегральному уменьшению сопротивления разрядного промежутка.

При холодных электронах наиболее вероятна диссоциация молекулы кислорода на два атомарных кислорода и возбуждения до метастабильного состояния, чем его ионизация, поскольку для ионизации необходимо больше энергии. Это означает, что большее количество холодных электронов обеспечивают наличие в разрядном промежутке большего количества атомарного кислорода для синтеза озона, что напрямую влияет на концентрацию озона на выходе.

Преимущества измененных электродов наиболее ярко проявляются при высоких давлениях (0,5 атм. и выше), поскольку длина свободного пробега электронов и ионов, дебаевский радиус, амбиполярная диффузия и т. д., то есть все процессы в плазме и их характерные размеры, сопоставимы с размерами измененных электродов.

3. Поскольку регулярные микрорельефы обеспечивают автоэмиссию большого количества холодных электронов, то это обеспечит еще одну важную проблему синтеза озона – сушку рабочего газа. Установлено, что электронная осушка воздуха не уступает по эффективности другим методам осушки рабочего газа. Это связано с тем, что молекулы воды, содержащиеся в потоке воздуха, имеют большое сродство с электронами и поэтому при контакте образуют устойчивые отрицательные ионы, что способствует тому, что молекулы воды не могут охватывать свободные электроны во время разряда [6].

Образование достаточного количества электронов, необходимых для уменьшения активности молекул воды, уменьшает образование HNO_3 , окисляющего электроды, что увеличивает срок их службы [5].

Выводы. Обработка электрода озонатора с нанесением регулярных микрорельефов обеспечивает:

- прирост выхода озона на 30...35%;
- равномерный износ электрода и удлинение его срока службы;
- постоянное распределение стримеров по остриям микрорельефов, следовательно, и обеспечение постоянной концентрации озона;
- увеличение диффузионного разряда и уменьшение температуры плазмы с последующим уменьшением вероятности появления окислов азота;
- автоэмиссию большого количества холодных электронов и, как следствие, осушку рабочего газа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Филиппов Ю.В., Вобликова В.А., Пантелеев В.И. Электросинтез озона. - М.: Изд-во МГУ, 1987. – 236 с.
2. Филиппов Ю. В., Вобликова В. А. Исследование различных факторов, влияющих на эффективность мощных высокочастотных озонаторов: Научно-технический отчет. - М.: Изд-во МГУ, 1991.
3. Лунин В.В., Попович М.П., Ткаченко С.Н. Физическая химия озона. – М.: Изд. МГУ, 1998.
4. Eliasson B., Egli W., Kogelschatz U. Modeling of dielectric barrier discharge chemistry. Pure & Appl. Chem. - 1994. - V.66, No. 6. - P. 1275-1286.
5. Самойлович В.Т., Гибалов В.И., Козлов К.В. Физическая химия барьерного разряда. - М.: Изд-во МГУ, 1989. – 175 с.
6. Энгельшт В.С. Озонатор. Патент России № 17544647, 15.04.92. Бюл.№30, 15.08.92. Перерегистрация 20.05.93.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 17.01.2006.

Ռ.Հ. ԳԵՎՈՐԳՅԱՆ

ԱՐԳԵԼՔԱՅԻՆ ՊԱՐՊՄԱՄԲ ՕԶՈՆԱՏՈՐՆԵՐԻ ՊԱՐՊՄԱՆ ԱՆՀԱՄԱՍԵՈՒԹՅԱՆ ԽՆԴԻ ԼՈՒՇՈՒՄԸ ԿԱԹՈԴԻ ՄԱԿԵՐԵԿՈՒՅԹԻ ՓՈՓՈԽՄԱՆ ՃԱՆԱՊԱՐՀՈՎ

Բժշկական նպատակներով օգտագործվող օզոնատորներն ունեն մի շարք թերություններ, որոնց մեծամասնությունը պայմանավորված է պարպման անհամասեռությամբ: Մույն աշխատանքում առաջարկվում է օզոնատորների անհամասեռ պարպման խնդրի լուծումը կաթոդի մակերևույթին ռեգուլյար միկրոռելիեֆներ ստեղծելու միջոցով, ինչն ապահովում է ելքում օզոնի խտության 30-35% աճ, էլեկտրոդների հավասարաչափ մաշում և աշխատանքային ռեսուրսի ծառայության տևողության երկարացում:

Առանցքային բաներ. օզոն, օզոնատոր, էլեկտրոդ, կաթոդի մակերևույթ, ռեգուլյար միկրոռելիեֆներ:

R.H. GEVORGYAN

DISCHARGE HETEROGENEITY PROBLEM SOLVING IN OZONIZERS WITH BARRIER DISCHARGE BY USING CATHODE SURFACE

Working with ozonizers the physicians using ozone face numerous technical problems mainly connected with discharge heterogeneity. Discharge heterogeneity problem solving in ozonizers by putting regular microreliefs on cathode surface providing ozone output for 30...35%, uniform electrode wear and prolonging its durability is given.

Keywords: ozone, ozonizer, electrode, cathode surface, regular microreliefs.

ՎԵՐՈՒՅՐ ՄԱՐԳԱՅԱՆԸ 70 ՏԱՐԵԿԱՆ Է



Լրացավ տեխնիկական գիտությունների դոկտոր, պրոֆեսոր, Երևանի Ճարտարապետության և շինարարության պետական համալսարանի «Գրունտների մեխանիկա, հիմքեր և հիմնատակեր» ամբիոնի վարիչ Վրույր Սարգսյանի ծննդյան 70 և գիտամանկավարժական գործունեության 45 տարին: Վ.Սարգսյանը ծնվել է 1935թ. դեկտեմբերի 27-ին: 1954 թվականին ավարտելով Երևանի 45-րդ դպրոցը՝ ընդունվել է Հայկական Գյուղատնտեսական ինստիտուտի հիդրոմելիորացիայի ֆակուլտետը, որն ավարտել է 1959 թվականին և ստացել հիդրոտեխնիկ-ճարտարագետի որակավորում:

1959-62թթ. աշխատել է Հիդրոտեխնիկայի և մելիորացիայի հայկական գիտահետազոտական

ինստիտուտում:

1962-65թթ. Վ. Սարգսյանը սովորել է Մոսկվայի ջրամատակարարման, կոյուղու, ինժեներական հիդրոերկրաբանության և հիդրոտեխնիկայի համամիութենական գիտահետազոտական ինստիտուտի ասպիրանտուրայում, որն ավարտելուց հետո աշխատել է Մոսկվայի միութենական ջրային տնտեսության «Հիդրոնախագիծ» գիտահետազոտական նախագծային ինստիտուտում որպես խմբի ղեկավար և գլխավոր մասնագետ: Այստեղ նա մասնակցել է մի շարք կարևոր օբյեկտների նախագծմանը, նորմատիվային փաստաթղթերի մշակմանը, կազմակերպել հետազոտական-փորձարարական արդյունքների մշակումը հաշվիչ մեքենաներով և այլն:

1969-82թթ. Վ.Սարգսյանն աշխատել է Մոսկվայի ВНИИВОДГЕО ինստիտուտի հատուկ հիդրոտեխնիկական կառուցվածքների լաբորատորիայում, որտեղ զբաղվել է ժողովրդական տնտեսության համար շատ կարևոր հիմնահարցի լուծմամբ՝ կապված արդյունաբերության ռադիոակտիվ թունավոր թափոնների թաղման և վնասագերծման հետ, մշակել է երկրակեղևի խոր շերտերում այդ նպատակով պահեստարանների ստեղծման և դրանց հիդրոդինամիկական հաշվարկման մեթոդները: Այս և այլ ուսումնասիրությունների արդյունքների հիման վրա նա գրել է իր դոկտորական թեզը:

Վ.Սարգսյանի կողմից առաջարկվել են դիֆերենցիալ հավասարումների համակարգեր, որոնցով բնութագրվում են միմյանցից խտությամբ և մածուցիկությամբ տարբերվող հեղուկների՝ ծակոտկեն միջավայրում շարժման օրինաչափությունները: Այդ հավասարումների լուծման արդյունքները, ակադեմիկոսներ Սեդովի, Տիխոնովի, Կոչինայի ներկայացմամբ, տպագրվել են ԽՍՀՄ Գիտությունների ակադեմիայի «Ջեկույցներում»:

Հաշվի առնելով ռադիոակտիվ թափոնների տրոհումից առաջ եկող ջերմաստիճանի բարձրացման վտանգը՝ 1976-77թթ. Վ.Սարգսյանի մասնակցությամբ մշակվել է նաև դրանց ջերմային ռեժիմի կանխագուշակման եղանակ:

Գիտության և տեխնիկայի պետական կոմիտեի հանձնարարությամբ Վ.Սարգսյանը 1977-82թթ. մասնակցել է Եվրոպայի և Սիբիրի ջրային ռեսուրսների վերբաշխման հետ կապված հարցերի լուծմանը:

1982թ. Երևանի Պոլիտեխնիկական ինստիտուտի հրավերով Վ.Սարգսյանը տեղափոխվեց Երևան և անցավ գիտամասնավարժական աշխատանքի. նրա ակտիվ մասնակցությամբ ինստիտուտում կազմակերպվեց «Գրունտների մեխանիկա, հիմքեր և հիմնատակեր» ամբիոնը, որը նա մինչև օրս ղեկավարում է: Ամբիոնում Վ.Սարգսյանի ղեկավարությամբ կատարվում են բազմակողմանի գիտական և ուսումնամեթոդական աշխատանքներ:

1985-87թթ. Հայաստանի ջրային տնտեսության նախարարության առաջարկությամբ Մասիսի շրջանում կատարվել են փորձարարական և տեսական ուսումնասիրություններ՝ ստորերկրյա ջրերի հորիզոնի իջեցումով պայմանավորված Երկրի մակերևույթի նստվածքների որոշման նպատակով:

1989թ. նախարարների խորհրդի որոշմամբ Վ.Սարգսյանի ղեկավարությամբ մեթոդական մեծ օգնություն է ցույց տրվել մասնագետներին՝ տեղանքի հետազոտական աշխատանքները բարձր մակարդակով կատարելու և հիմքերը ջրածածկումից պաշտպանելու համար: 1990թ. Պետշինի «Ինժնախագիծ» ինստիտուտի առաջարկությամբ կատարվել են Լենինական (Գյումրի) քաղաքի տարածքում ստորգետնյա ջրերի հորիզոնի իջեցմանը նպատակաուղղված հետազոտություններ, որոնք հնարավորություն են տալիս նվազեցնել տեղանքի սեյսմայնությունը: Աղետի գոտում կատարած ակտիվ և պարբերական աշխատանքների համար Վ.Սարգսյանը 1989թ. արժանացել է նախկին ԽՍՀՄ «Պետշինի» պատվոգրի:

Պրոֆ. Վ.Սարգսյանը գիտության հմուտ կազմակերպիչ է: Նրա ղեկավարությամբ բազմաթիվ ասպիրանտներ և հայցորդներ պաշտպանել են թեկնածուական, իսկ երկու գիտության թեկնածու՝ դոկտորական թեզեր: Վ.Սարգսյանի հոդվածները պարբերաբար տպագրվում են ՀՀ ԳԱԱ «Ձեկույցներում» և «Տեղեկագրերում»:

Պրոֆ. Վ.Սարգսյանը ճանաչված մասնագետ է ջրային ռեսուրսների, երկրամեխանիկայի և երկրահիդրոմեխանիկայի ասպարեզներում. նրա գրչին են պատկանում 200-ից ավելի գիտական աշխատանքներ, հոդվածներ ու մենագրություններ, որոնց մի մասը թարգմանված է արտերկրում:

1971թ. Վ. Սարգսյանի նոր մենագրությունն արժանացել է Ժողովրդական տնտեսության նվաճումների համամիութենական ցուցահանդեսի արծաթե մեդալի:

Պրոֆ. Վ.Սարգսյանը զեկուցումներով հանդես է եկել համամիութենական և միջազգային համագումարներում, կոնգրեսներում և կոնֆերանսներում՝ ջրային ռեսուրսների, տեսական և կիրառական երկրահիդրոմեխանիկայի զանազան հարցերի վերաբերյալ:

Տեխնիկական գիտ. դոկտոր, պրոֆեսոր Վ.Ս.Սարգսյանը խոշոր ներդրում ունի տեսական և կիրառական երկրահիդրոմեխանիկայի և երկրամեխանիկայի ասպարեզներում, պատրաստել է բազմաթիվ գիտական կադրեր, գիտության այդ ասպարեզը հարստացրել է առաջնակարգ գիտական նշանակություն ունեցող արդյունքներով:

Վ.Սարգսյանը երեք միջազգային կազմակերպությունների և ՀՀ տեսական ու կիրառական մեխանիկայի ազգային կոմիտեի, մի շարք նախարարությունների և ինստիտուտների խորհուրդների, ինչպես նաև 030 և 055 գիտական մասնագիտական խորհուրդների, ՀՀ ԳԱԱ-ի «Տեղեկագրի» (տեխնիկական գիտություններ) խմբագրական կոլեգիայի անդամ է:

Տեղեկագրի խմբագրական կոլեգիան շնորհավորում է գործընկերոջ 70-ամյակը և ցանկանում հետագա բեղմնավոր աշխատանք

ԲՈՎԱՆԴԱԿՈՒԹՅՈՒՆ

ՄԱՐԳՍՅԱՆ ՅԼԼ., ՍՏԵՓԱՆՅԱՆ Կ.Գ., ԳԵՎՈՐԳՅԱՆ Հ.Ա. ԱՌԱՋԳԱԿԱՆ ՃՅՈՒՂԱՎՈՐՎԱԾ ՄԵԽԱՆԻԿԱԿԱՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳԵՐԻ ԴԻՆԱՄԻԿԱԿԱՆ ՎԵՐԼՈՒԾՈՒԹՅՈՒՆԸ ԱՐՏԱՔԻՆ ԿԱՊԵՐԻ ԲԱՑԱԿԱՅՈՒԹՅԱՆ ԴԵՊՔՈՒՄ	3
.....	
ՄՏԱԿՅԱՆ Մ.Գ., ՄԱՐԳԱՐՅԱՆ Ա.Գ., ՄԱՆՈՒԿՅԱՆ Մ.Ա. ԿՈՌՈՋԻՈՆ ՀՈԳՆԱԾԱՅԻՆ ԴԻՄԱԴՐՈՒԹՅԱՆ ԳՆԱՀԱՏՄԱՆ ՄԵԹՈԴԱԲԱՆՈՒԹՅՈՒՆԸ ԵՎ ՀԱՇՎԱՐԿՆԵՐԻ ԱՎՏՈՄԱՏԱՅՈՒՄԸ	10
.....	
ՇԵԿՅԱՆ Հ.Գ., ԽԱԼԱԹՅԱՆ Հ.Պ., ԽԱԼԱԹՅԱՆ Է.Պ., ԽԱԼԱԹՅԱՆ Ռ.Պ. ՍՈՒԲՀԱՐՄՈՆԻԿ ՌԵԶՈՆԱՆՍԸ ՌՈՏՈՐԱՅԻՆ ՄԵՔԵՆԱՆԵՐՈՒՄ	19
.....	
ՄԻՍՈՆՅԱՆ Մ.Մ. ԸՆԴՀԱՏ ԿՏՐՄԱՆ ԱՆՅՈՒՄԱՅԻՆ ԳՈՐԾԸՆԹԱՅՈՒՄ ԴԻՆԱՄԻԿԱԿԱՆ ՈՒԺԻ ՀԵՏԱԶՈՏՄԱՆ ՄԵԹՈԴԻԿԱՅԻ ՎԵՐԱԲԵՐՅԱԼ	25
.....	
ՄԻՍՈՆՅԱՆ Ա.Մ., ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ Լ.Վ. ՀԱՄԱՊԻՏԱՆԻ ԲՈՆԻԶԻ ՕՊՏԻՄԱԼ ՆԱԽԱԳԾՄԱՆ ՀԱՐՑԻ ՄԱՍԻՆ	31
ԱՂԲԱԼՅԱՆ Մ.Գ., ԵՂԻԱԶԱՐՅԱՆ Ռ.Մ. ՄԽՄԱՆ ԵՂԱՆԱԿՆԵՐԻ ԱԶԴԵՅՈՒԹՅՈՒՆԸ ԿՈՒԷԼԻ ԹՈՒՋԵՐԻ ԿԱՌՈՒՑՎԱԾՔԻ ԵՎ ՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՁԵՎԱՎՈՐՄԱՆ ՎՐԱ	38
.....	
ՏՈՆՈՅԱՆ Ա.Հ., ՊՈՂՈՍՅԱՆ Մ.Հ., ՎԱՐԴԵՐԵՍՅԱՆ Ա.Զ., ԴԱՎԹՅԱՆ Մ.Պ. ԱԴԻԱԲԱՏ ՊԱՅՄԱՆՆԵՐՈՒՄ Ե -ԿԱՊԻՏԱԿԱՆ ՆԱԽՈՆԱՅԻՆ ԱԿՏԻՎԱՅՎԱԾ ՊՈԼԻՄԵՐԱՅՄԱՆ ԿԻՆԵՏԻԿԱՆ	44
ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ Հ.Ս., ԹՈՒՄԱՆՅԱՆ Գ.Ա., ՀԱՄԲԱՐՁՈՒՄՅԱՆ Է.Գ. ՖԵՐՈՍՈԼԻԲԴԵՆԻ ՀԻՄՔՈՎ ՍՏԱՅՎԱԾ ՓՈՇԵԿՈՄՊՈԶԻՑԻՈՆ ՆՅՈՒԹԵՐԻ ՀԱԿԱՇՓԱԿԱՆ ՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԸ ԵՎ ԿԱՌՈՒՑՎԱԾՔԱՅԻՆ ՎԵՐԼՈՒԾՈՒԹՅՈՒՆԸ	53
ՄԱՐՏԻՐՈՍՅԱՆ Վ.Հ., ՇՄԱՎՈՆՅԱՆ Ա. ՅԼԼ., ՄԱՍՈՒՆՅԱՆ Մ.Է., ԶԱՔԱՐՅԱՆ Ք.Լ., ՉԻՏԱՆՅԱՆ Ա.Հ. ՔՐՈՄԻՏՆԵՐԻ ԱԼՅՈՒՄԻՆԱԹԵՐՄԱՅԻՆ ՎԵՐԱԿԱՆԳՆՄԱՆ ԱՐԱԳՈՒԹՅԱՆ ՎՐԱ ԱԶԴՈՂ ԳՈՐԾՈՆՆԵՐԸ	61
.....	
ՄԿՐՏՉՅԱՆ Լ.Հ., ՊՈՂՈՍՅԱՆ Մ.Ա., ԳԵՈՔՉՅԱՆ Օ.Ղ., ՄԱՎՉԵՆԿՈ Լ.Մ.	

Բժշկական Աղյուսակների ԲԱՂԱԴՐՈՒԹՅԱՆ ՄՇԱԿՈՒՄ՝ ՏԵՂԱԿԱՆ ՀՈՒՄՔԻ ՀԻՄԱՆ ՎՐԱ	69
ՄԻՆԱՍՅԱՆ Զ.Ա., ՄԱՅԻԼՅԱՆ Է.Է.	
ԿՈՇԻԿԻ ՆՅՈՒԹԵՐԻ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԸ ԶԳՄԱՆ ԴԵՊՔՈՒՄ	74
ՀՈՎՀԱՆՆԻՍՅԱՆ Ա.Հ.	
ՎԱՐԸՆԹԱՑ ՇԵՐՏԵՐԻ ՀԱՆՈՒՅԹՈՎ ԵՎ ՊՆԴԱՑՈՂ ԼՑԱՆՑՈՒԹՈՎ ՄՇԱԿՄԱՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳԻ ՕՊՏԻՄԱԼ ԱՑՈՒՄ	78
ՀԱԿՈԲՅԱՆ Ռ.Զ.	
ԱՊԱՐՆԵՐԻ ԱՆԻՋՈՏՐՈՊՈՒԹՅԱՆ ՑՈՒՑԱՆԻՇԻ ՈՐՈՇՈՒՄԸ ԲԱՐՁՐ ՃՆՇՄԱՆ ՏԱԿ	88
ԱՂԱՅԱՆ Ա.Ա.	
ԿԱՊԱՐԻ ՍՈՒԼՖԻԴԱՅԻՆ ԽՏԱՆՑՈՒԹԻ ՕՔՍԻԴԱՐԱՐ ԲՈՎՄԱՆ ԳՈՐԾԸՆԹԱՅԻ ՈՒՍՈՒՄՆԱՍԻՐՈՒՄԸ	94
ԴԱՐԲԻՅԱՆ Մ.Ս.	
ՏԱՏԱՆՈՒՄՆԵՐԻ ՏԵՍՈՒԹՅԱՆ ՄԵԿ ՌԵՈԼՈԳԻԱԿԱՆ ՄՈԴԵԼԻ ՄԱՍԻՆ	99
ՄԵՍՉՅԱՆ Ս.Ռ., ԹԱՍԼԱԳՅԱՆ Կ.Ա.	
ԿԻՆԵՄԱՏԻԿԱԿԱՆ ՌԵԺԻՄՈՎ ԿԱՎԱՅԻՆ ԳԵՏԱՀՈՂԵՐԻ ՌԵՈԼՈԳԻԱԿԱՆ ՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԸ ՓՈՐՁԱՆՄՈՒՇՆԵՐԻ ՈԼՈՐՄԱՆ ԵՂԱՆԱԿՈՎ ՈՐՈՇՈՂ ԿԱՅԱՆՔՆԵՐ	107
ԽԱՉԱՏՐՅԱՆ Վ.Ս., ԽԱՉԱՏՐՅԱՆ Կ.Վ., ԳՐԻԳՈՐՅԱՆ Ս.Է., ՂՈՒԼՅԱՆ Ա.Գ.	
ԷԼԵԿՏՐԱԷՆԵՐԳԵՏԻԿԱԿԱՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳԻ ԹՈՒՅԼԱՏՐԵԼԻ ԿԱՅՈՒՆԱՑՎԱԾ ՌԵԺԻՄԻ ՀԱՇՎՈՒՄԸ P-Q, P-U ՏԵՄՔԻ ԿԱՅԱՆԱՅԻՆ ՀԱՆԳՈՒՅՑՆԵՐԻ ԴԵՊՔՈՒՄ	112
ՄԻՆԱՍՅԱՆ Ս.Ա., ԱՌԱՔԵԼՅԱՆ Է.Կ., ԱՂԱԲԱԲՅԱՆ Գ. Է.	
ԿՈՆԴԵՆՍԱՑԻՈՆ ԷԼԵԿՏՐԱԿԱՅԱՆՆԵՐԻ ԳԵՆԵՐԱՑՆՈՂ ՍԱՐՔԱՎՈՐՄԱՆ ԿԱԶՄԻ ԸՆՏՐՈՒԹՅԱՆ ԵՎ ԷՆԵՐԳԱԲԼՈԿՆԵՐԻ ՄԻՋԵՎ ԷԼԵԿՏՐԱԿԱՆ ԲԵՌՆՎԱԾՔԻ ՕՊՏԻՄԱԼ ԲԱՇԽՄԱՆ ՄԵԹՈԴԻԿԱ՝ ՕՐԱԿԱՆ ԷԼԵԿՏՐԱԿԱՆ ԲԵՌԻ ԳՐԱՖԻԿՆԵՐԻ ԾԱԾԿՄԱՆ ՊԱՅՄԱՆՆԵՐՈՒՄ	123
ՄԱՖԱՐՅԱՆ Վ.Ս., ՉԱՍՅԱՆ Ա.Հ.	
ԲԱՇԽՉ ԶԱՆՑԵՐՈՒՄ ԲԵՌՆՎԱԾՔՆԵՐԻ ԱԿՏԻՎ ՀԶՈՐՈՒԹՅԱՆ ԿՈՐՈՒՍՏՆԵՐԻ ՄԱՍՆԱԲԱԺԻՆՆԵՐԻ ՈՐՈՇՈՒՄԸ	134
ՄԵԼԻՔՅԱՆ Զ. Ա., ԽԱՐԱԶՅԱՆ Վ. Ռ.	
ՋԵՐՄՈՒԹՅԱՆ ԵՎ ԷԼԵԿՏՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՀԱՄԱԿՑՎԱԾ ԱՐՏԱԴՐՈՒԹՅԱՆ ԿԱՅԱՆՆԵՐԻՑ ՇԵՆՔԵՐԻ ՋԵՐՄԱԷՆԵՐԳԱՄԱՏԱԿԱՐԱՐՄԱՆ ԿԵՆՏՐՈՆԱՑՎԱԾ ՀԱՄԱԿԱՐԳԻ ՕՊՏԻՄԱԼԱՑՄԱՆ ՄԱԹԵՄԱՏԻԿԱԿԱՆ ՄՈԴԵԼ	140

ՇԱՀՎԵՐԴՅԱՆ Ս.Վ., ՄԻՄՈՆՅԱՆ Ա.Ռ.

¹⁶N ՌԱԴԻՈՆՈԻԿԼԻԴԻ ՏՐՈՇՄԱՆ ԱՌԱՆՁՆԱՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ
ՕԳՏԱԳՈՐԾՈՒՄԸ ՀԱԷԿ-Ի ԱՌԱՋԻՆ ԿՈՆՏՈՒՐԻՑ ԱՐՏԱՀՈՍՔԻ
ԳՐԱՆՑՄԱՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳՈՒՄ 150

ԱՂԱՄՅԱՆ Ա. Զ.

ԳԱԶԱՅԻՆ ՍԵՆՍՈՐՆԵՐԻ ՊԱՐԱՄԵՏՐԵՐԻ ԾՐԱԳՐԱՅԻՆ ՂԵԿԱՎԱՐՄԱՄԲ
ՉԱՓՄԱՆ ՍԱՐՔ 155

ՂԱՄԲԱՐՅԱՆ Ա.Ա.

ԱՐՅԱՆ ԶԱՐԿԵՐԱԿԱՅԻՆ ՃՆՇՄԱՆ ՕՂԱԿԱԶԵՎ ՄԱԳՆԻՍԱՃԿՈՒՆ
ԿԵՐՊԱՓՈԽԻՉ 161

ՄԱՆՈՒԿՅԱՆ Ս.Ն., ԹԱԴԵՎՈՍՅԱՆ Ա.Վ., ՄԻՔԱՅԵԼՅԱՆ Ն.Վ.

ԶԵՐՄԱՓՈԽԱՆԱԿՄԱՆ ՊՐՈՑԵՍԻ ՎԱՐՄԱՆ ՕՊՏԻՄԱԼ ՌԵԺԻՄԻ
ԱԼԳՈՐԻԹՄԻ ԿԱՌՈՒՑՈՒՄ 167

ՀՈՎՀԱՆՆԻՍՅԱՆ Ա. Գ.

ԶԱՅՆԱՅԻՆ ԱԶԴԱՆՇԱՆԻ ՏԱՐՐԱՊԱՏԿԵՐԻՑ ՖՈՐՄԱՆՏՆԵՐԻ
ԱՌԱՆՁՆԱՑՄԱՆ ԱՐԴՅՈՒՆԱՎԵՏ ԱԼԳՈՐԻԹՄ 177

ՄԵԼԻՔՅԱՆ Վ.Շ., ԴԱՎԹՅԱՆ Դ.Ֆ., ՖԱՆՅԱՆ Կ.Ա.

ՎԻՃԱԿԱՅԻՆ ՔԱՂՎԱԾՔԻ ԵՎ ԿԱՐՃԱԳՈՒՅՆ ՃԱՆԱՊԱՐՀԻ
ՆԵՐԿԱՅԱՑՄԱՆ ՎՐԱ ՀԻՄՆՎԱԾ ՄՈԴԵԼԱՎՈՐՄԱՆ
ՄԵԹՈԴԱԲԱՆՈՒԹՅՈՒՆ ԿՄՕԿ ՏԵԽՆՈԼՈԳԻԱՆԵՐՈՒՄ ԷԼԵԿՏՐԱՍՏԱՏԻԿ
ԼԻՑԲԱԹԱՓՄԱՆ (ԷՍԼ) ՀԵՏԱԶՈՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՀԱՄԱՐ 184

**ՀԱՐՈՒԹՅՈՒՆՅԱՆ Ս.Ռ., ԿԱՐԱՊԵՏՅԱՆ Վ.Ե., ԲԱԴԱԼՅԱՆ Գ.Ր.,
ԿՈՒԶԱՆՅԱՆ Ա.Ս.**

LiNbO₃ ՏԱԿԴԻՐԻ ՎՐԱ YBCO ԲԱՐԱԿ ԹԱՂԱՆԹՆԵՐԻ ԼԱԶԵՐԱՅԻՆ
ՓՈՇԵՆՍԵՑՄԱՆ ՈՐՈՇ ԱՌԱՆՁՆԱՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐ 190

ԱՎԵՏԻՍՅԱՆ Վ.Հ.

ՄԵՏԱՂԱՄԵԿՈՒՄԻՉ ԱԼԻՔՍԱՐՆԵՐԻ ԿԻՐԱՌՈՒՄԸ ԿԱՐՃ
ՄԻԼԻՄԵՏՐԱՆՈՑ ԱԼԻՔՆԵՐԻ ՏԻՐՈՒՅԹԻ ԱՆՏԵՆԱՅԻՆ ՉԱՓՈՒՄՆԵՐՈՒՄ 195

ԹԵՐԶՅԱՆ Հ.Ա., ՄԱՐԳՍՅԱՆ Գ.Գ.

ՈՐՈՇՈՒՄՆԵՐԻ ԸՆԴՈՒՆՄԱՆ ԶՈՒԳԱՀԵՌ ԱԼԳՈՐԻԹՄՆԵՐ 202

ԳՐԻԳՈՐՅԱՆ Ֆ.Պ.

ՆԱԽՕՐՈՔ ՏՐՎԱԾ ՏԱՐՐԱՊԱՏԿԵՐՈՎ ԲԱԶՄԱՉԱՓ ԿԱՌԱՎԱՐՄԱՆ
ՄԻՆԹԵԶԸ 210

ՓԱՅՉՈՒԿ Բ.

ԽԱՓԱՆՈՒՄՆԵՐԻ ՆԿԱՏՄԱՄԲ ԴԻՄԱՑԿՈՒՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳԵՐԻ
ՀՈՒՄԱԼԻՈՒԹՅԱՆ ՄՈԴԵԼԱՎՈՐՈՒՄԸ ԿԻՍԱՄԱՐԿՈՎՅԱՆ ՎԻՃԱԿՆԵՐԻ
ՏԱՐԱԾՈՒԹՅԱՆ ՕԳՏԱԳՈՐԾՄԱՄԲ 217

ԱՅՎԱԶՅԱՆ Ռ.Ս., ԱՅՎԱԶՅԱՆ Ա.Ռ.

ՆԵՐՔԻՆ ԱՅՐՄԱՆ ՇԱՐԺԻՉՆԵՐՈՒՄ /ՆԱՇ/ ԻՆԴԻԿՍՈՐԱՅԻՆ ԱՇԽԱՏԱՆՔԻ ԹԵՐՕԳՏԱԳՈՐԾՄԱՆ ԳՈՐԾԱԿԻՑԸ	227
---	------------

ԳԵՎՈՐԳՅԱՆ Ռ.Հ.

ԱՐԳԵԼՔԱՅԻՆ ՊԱՐՊՄԱՄԲ ՕԶՈՆԱՏՈՐՆԵՐԻ ՊԱՐՊՄԱՆ ԱՆՀԱՄԱՍԵ- ՌՈՒԹՅԱՆ ԽՆԴՐԻ ԼՈՒԾՈՒՄԸ ԿԱԹՈՂԻ ՄԱԿԵՐԵՎՈՒՅԹԻ ՓՈՓՈԽՄԱՆ ՃԱՆԱՊԱՐՀՈՎ	231
ՎՐՈՒՅՐ ՍԱՐԳՍՅԱՆԸ 70 ՏԱՐԵԿԱՆ Է	236

СОДЕРЖАНИЕ

САРКИСЯН Ю.Л., СТЕПАНЯН К.Г., ГЕВОРКЯН Г.А. ДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ УПРУГИХ ДРЕВОВИДНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ БЕЗ ВНЕШНИХ СВЯЗЕЙ	3
СТАКЯН М.Г., МАРГАРЯН А.Г., МАНУКЯН М.А. МЕТОДОЛОГИЯ ОЦЕНКИ СОПРОТИВЛЕНИЯ КОРРОЗИОННОЙ УСТАЛОСТИ И АВТОМАТИЗАЦИЯ РАСЧЕТОВ	10
ШЕКЯН Г.Г., ХАЛАТЯН А.П., ХАЛАТЯН Э.П., ХАЛАТЯН Р.П. СУБГАРМОНИЧЕСКИЙ РЕЗОНАНС В РОТОРНЫХ МАШИНАХ	19
СИМОНЯН М.М. К МЕТОДИКЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ СИЛЫ ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА ПЕРЫВИСТОГО РЕЗАНИЯ	25
СИМОНЯН А.М., ПЕТРОСЯН Л.В. К ВОПРОСУ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЗАХВАТНЫХ ПРИСПОСОБЛЕНИЙ ..	31
АГБАЛЯН С.Г., ЕГИАЗАРЯН Р.С. ВЛИЯНИЕ СПОСОБОВ ЗАКАЛКИ НА ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ КОВКИХ ЧУГУНОВ	38
ТОНОЯН А.О., ПОГОСЯН М.Г., ВАРДЕРЕСЯН А.З., ДАВТЯН С.П. КИНЕТИКА АДИАБАТИЧЕСКОЙ АНИОННОЙ АКТИВИРОВАННОЙ ПОЛИМЕРИЗАЦИИ (- КАПРОЛАКТАМА. ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССА ПОЛИМЕРИЗАЦИИ	44
ПЕТРОСЯН А.С., ТУМАНЯН Г.А., АМБАРЦУМЯН Э.Г. АНТИФРИКЦИОННЫЕ СВОЙСТВА И МИКРОСТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ ПОРОШКОВЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ, ПОЛУЧЕННЫХ НА ОСНОВЕ ФЕРРОМОЛИБДЕНОВОЙ МАТРИЦЫ	53
МАРТИРОСЯН В.А., ШМАВОНЯН А.Ю., САСУНЦЯН М.Э., ЗАКАРЯН К.Л., ЧИТАНЯН А.О. ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА СКОРОСТЬ АЛЮМИНОТЕРМИЧЕСКОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ ХРОМИТОВ	61
МКРТЧЯН Л.А. , ПОГОСЯН М.А., ГЕОКЧЯН О.К., САВЧЕНКО Л.М. РАЗРАБОТКА СОСТАВОВ МЕДИЦИНСКОГО СТЕКЛА НА ОСНОВЕ МЕСТНЫХ СЫРЬЕВЫХ МАТЕРИАЛОВ	69
МИНАСЯН З.А., МАИЛЯН Э.Э. ИССЛЕДОВАНИЕ ОБУВНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА РАСТЯЖЕНИЕ	74
ОГАНЕСЯН А.Г. ОПТИМИЗАЦИЯ НИСХОДЯЩЕЙ СИСТЕМЫ РАЗРАБОТКИ С	78

ПОСЛОЙНОЙ ВЫЕМКОЙ РУДЫ С ТВЕРДЕЮЩЕЙ ЗАКЛАДКОЙ	
<i>АКОПЯН Р.З.</i>	
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ АНИЗОТРОПИИ ГОРНЫХ ПОРОД ПОД ВЫСОКИМ ДАВЛЕНИЕМ	88
<i>АГАЯН А.А.</i>	
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОКИСЛИТЕЛЬНОГО ОБЖИГА СУЛЬФИДНОГО КОНЦЕНТРАТА СВИНЦА	94
<i>ДАРБИНЯН С.С.</i>	
ОБ ОДНОЙ РЕОЛОГИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ТЕОРИИ КОЛЕБАНИЙ	99
<i>МЕСЧЯН С.Р., ТАСЛАГЯН К.А.</i>	
УСТРОЙСТВА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГРУНТОВ МЕТОДОМ КРУЧЕНИЯ ОБРАЗЦОВ В КИНЕМАТИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ	107
<i>ХАЧАТРЯН В.С. , ХАЧАТРЯН К. В., ГРИГОРЯН С. Э., ГУЛЯН А.Г.</i>	
РАСЧЕТ ДОПУСТИМОГО УСТАНОВИВШЕГОСЯ РЕЖИМА ЭЛЕКТРО- ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПРИ P-Q, P-U ТИПАХ СТАНЦИОННЫХ УЗЛОВ	112
<i>МИНАСЯН С.А., АРАКЕЛЯН Э.К., АГАБАБЯН Г.Э.</i>	
МЕТОДИКА ВЫБОРА СОСТАВА ГЕНЕРИРУЮЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ КОНДЕНСАЦИОННЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ И ОПТИМАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ МЕЖДУ НИМИ ПРИ ПОКРЫТИИ СУТОЧНЫХ ГРАФИКОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ	123
<i>САФАРЯН В. С., ЧАМЯН А. А.</i>	
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОЛИ ПОТЕРЬ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ НАГРУЗОК В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ	134
<i>МЕЛИКЯН З.А., ХАРАЗЯН В.Р.</i>	
ОПТИМИЗАЦИОННАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ ЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО ТЕПЛОЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ ЗДАНИЙ ОТ СТАНЦИИ С КОМБИНИРОВАННЫМ ПРОИЗВОДСТВОМ ТЕПЛА И ЭЛЕКТРИЧЕСТВА	140
<i>ШАГВЕРДЯН С.В., СИМОНЯН А.Р.</i>	

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ РАСПАДА РАДИОНУКЛИДА ^{16}N В СИСТЕМЕ РЕГИСТРАЦИИ ТЕЧИ ИЗ ПЕРВОГО КОНТУРА	150
АДАМЯН А.З.	
ПРОГРАММНО-УПРАВЛЯЕМАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ГАЗОВЫХ СЕНСОРОВ	155
ГАМБАРЯН А.А.	
КОЛЬЦЕВОЙ МАГНИТОУПРУГИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ АРТЕРИАЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ КРОВИ	161
МАНУКЯН С. Н., ТАТЕВОСЯН А. В., МИКАЕЛЯН Н. В.	
АЛГОРИТМ ПОСТРОЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОГО РЕЖИМА ВЕДЕНИЯ ТЕПЛООБМЕННОГО ПРОЦЕССА	167
ОГАНЕСЯН А.Г.	
ЭФФЕКТИВНЫЙ АЛГОРИТМ ВЫДЕЛЕНИЯ ФОРМАНТ ИЗ СПЕКТРА РЕЧЕВОГО СИГНАЛА	177
МЕЛИКЯН В.Ш., ДАВТЯН Д.Ф., ФАНЯН К.А.	
МЕТОДОЛОГИЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЙ РАЗГРУЗКИ В КМОП ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ОБУСЛОВЛЕННОГО ИЗВЛЕЧЕНИЯ И ПРЕДСТАВЛЕНИИ ЭСР КРАТЧАЙШИМ ПУТЕМ	184
АРУТЮНЯН С.Р., КАРАПЕТЯН В.Е., БАДАЛЯН Г.Р., КУЗАНЯН А.С.	
НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ЛАЗЕРНОГО НАПЫЛЕНИЯ ПЛЕНОК УВСО НА ПОДЛОЖКИ LiNbO_3	190
АВЕТИСЯН В.Г.	
ПРИМЕНЕНИЕ МЕТАЛЛОДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВОЛНОВОДОВ В АНТЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЯХ ДИАПАЗОНА КОРОТКИХ МИЛЛИМЕТРОВЫХ ВОЛН	195
ТЕРЗЯН А.А., САРКИСЯН Г.Г.	
ПАРАЛЛЕЛЬНЫЕ АЛГОРИТМЫ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ	202
ГРИГОРЯН Ф.П.	
СИНТЕЗ МНОГОМЕРНОГО УПРАВЛЕНИЯ С НАПЕРЕД ЗАДАННЫМ СПЕКТРОМ	210
ПАЙЧУК Р.	
МОДЕЛИРОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ ТОЛЕРАНТНЫХ ОТНОСИТЕЛЬНО ОТКАЗОВ СИСТЕМ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПОЛУМАРКОВСКИХ ПРОСТРАНСТВ СОСТОЯНИЙ	217
АЙВАЗЯН Р.С., АЙВАЗЯН А.Р.	
КОЭФФИЦИЕНТ НЕДОИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИНДИКАТОРНОЙ РАБОТЫ ДВС	227
ГЕВОРКЯН Р.Г.	
РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ НЕОДНОРОДНОСТИ РАЗРЯДА В ОЗОНАТОРАХ	

С БАРЬЕРНЫМ РАЗРЯДОМ ПУТЕМ ИЗМЕНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ КАТОДА	231
К 70-ЛЕТИЮ ВРУЙРА САРКИСЯНА	236

CONTENTS

SARGSYAN Yu.L., STEPANYAN K.G., GEVORGYAN H.A. DYNAMIC ANALYSIS OF FLEXIBLE TREE-LIKE MECHANICAL SYSTEMS WITHOUT EXTERNAL CONSTRAINTS	3
STAKYAN M.G., MARGARYAN A.G., MANUKYAN M.A. METHODOLOGY OF EVALUATION CORROSION FATIGUE RESISTANCE AND AUTOMOTIZATION OF CALCULATION	10
SHEKYAN H.G., KHALATYAN H.P., KHALATYAN E.P., KHALATYAN R.P. SUBHARMONIC RESONANCE IN ROTOR MACHINES	19
SIMONYAN M.M. METHODOLOGY OF DYNAMIC FORCE INVESTIGATION IN THE INTERRUPTED CUTTING TRANSITION PROCESS	25
SIMONIAN A.M., PETROSIAN L.V. ON PROBLEMS OF OPTIMAL UNIVERSAL CLAW PROJECTION	31
AGHBALYAN S.G., YEGHIAZARYAN R.S. HARDENING METHOD INFLUENCE ON SHAPING THE STRUCTURE AND CHARACTERISTICS FOR FORGING CAST IRON	38
TONOYAN A.O., POGHOSYAN M.H., VARDERESYAN A. Z., DAVTYAN S.P. KINETICS OF ADIABATIC ANION ACTIVATED POLYMERIZATION OF ε -CAPROLACTAM	44
PETROSYAN H.S., TUMANYAN G.H., HAMBARTSUMYAN E.G. ANTIFRICTION PROPERTIES AND A MICROSTRUCTURAL ANALYSIS OF POWDER COMPOSITE MATERIAL OBTAINED IN THE TERMS OF IRON MATRIX	53
MARTIROSYAN V.H., SHMAVONYAN A.Yu., SASUNTSYAN M.E., ZAKARYAN K.L., CHITANYAN A. H. FACTORS INFLUENCING THE SPEED OF CHROMITE ALUMINIUM- THERMAL RESTORATION PROCESS	61
MKRTCHYAN L.H., POGHOSYAN M.A., GEOKCHYAN O.GH., SAVCHENKO L.M. DEVELOPMENT OF MEDICAL GLASS COMPOSITIONS ON THE BASIS OF LOCAL RAW MATERIALS	69
MINASYAN Z.A., MAYILYAN E.E. SHOE MATERIAL STUDY FOR STRETCHING	74
HOVHANNESYAN A.H. OPTIMIZATION OF THE FALLING DEVELOPMENT SYSTEM WITH LAYER ORE EXTRACTION AND HARDENING FILLING	78
HAKOBYAN R.Z. DETERMINATION OF ROCK ANISOTROPY UNDER HIGH PRESSURE ...	88
AGHAYAN A.A. INVESTIGATION OF THE OXIDATIVE ROASTING PROCESS FOR THE SULPHIDE LEAD CONCENTRATE	94

DARBINYAN S.S.	
ON RHEOLOGICAL MODEL OF VIBRATIONS THEORY	99
MESCHYAN S.R., TASLAGYAN K.A.	
UNIT FOR SPECIFYING REOLOGICAL PROPERTIES OF GROUNDS BY SAMPLE TORSION METHOD IN KINEMATICAL CONDITION	107
KHACHATRYAN V.S., KHACHATRYAN K.V., GRIGORYAN S.E., GHULYAN A.G.	
DESIGN OF PERMISSIBLE STEADY-STATE CONDITION OF ELECTRICAL POWER SYSTEM FOR P-Q, P-U TYPES OF STATION UNITS	112
MINASYAN S.A., ARAKELYAN E. K., AGHABABYAN G. E.	
METHOD FOR THE COMPOSITION SELECTION OF CONDENSING PLANTS GENERATING EQUIPMENT AND OPTIMAL DISTRIBUTION OF ELECTRIC LOAD AMONG POWER UNITS WITH THE COVERAGE OF DAILY LOAD DIAGRAMS	123
SAFARYAN V.S., CHAMYAN A.H.	
DEFINITION OF ACTIVE POWER LOSS PROPORTION LOADS IN DISTRIBUTION NETWORKS	134
MELIKYAN Z. A., KHARAZYAN V. R.	
OPTIMIZATION OF SIMULATION MODEL FOR A SYSTEM OF CENTRALIZED HEAT AND ELECTRICITY SUPPLY FROM COGENERATION POWER PLANT.....	140
SHAHVERDYAN S.V., SIMONYAN A.R.	
USE OF DISINTEGRATION RADIONUCLIDE ¹⁶ N FEATURES IN SYSTEMS OF FURFACE REGISTRATIONS FROM THE FIRST CONTOUR	150
ADAMYAN A.Z.	
SOFTWARE-CONTROLLED SETUP FOR GAS SENSOR PARAMETER MEASUREMENTS	155
GHAMBARYAN A.A.	
CIRCULAR MAGNETOELASTIC TRANSFORMER OF BLOOD PRESSURE	161
MANUKYAN S.N., TATEVOSYAN A.V., MIKAELYAN N.V.	
ALGORITHM OF THE OPTIMUM MODE CONSTRUCTION FOR CONDUCTING HEAT EXCHANGE PROCESS	167
HOVHANNISYAN A.G.	
EFFECTIVE VOICE SIGNAL FORMANT RECOGNITION ALGORITHM	177
MELIQYAN V.Sh., DAVTYAN D.F., FANYAN K.A.	
SIMULATION METHODOLOGY BASED ON CONDITIONAL EXTRACTION AND SHORTEST PATH REPRESENTATION FOR ELECTROSTATIC DISCHARGE (ESD) ANALYSIS IN CMOS TECHNOLOGIES	184
HARUTYUNYAN S.R., KARAPETYAN V.E., BADALYAN G.R., KUZANYAN A.S.	
SOME FEATURES OF LASER DEPOSITION OF YBCO FILMS ON LiNbO ₃ SUBSTRATES	190

AVETISYAN V.H.	
APPLICATION OF METAL-DIELECTRIC WAVEGUIDES IN SHORT MILLIMETER WAVEBAND ANTENNA MEASUREMENTS	195
TERZIAN H.A., SARGSYAN G.G.	
PARALLEL ALGORITHMS FOR DECISION MAKING	202
GRIGORYAN F.P.	
MULTIVARIABLE CONTROL SYNTHESIS WITH IN ADVANCE GIVEN SPECTRUM	210
PAICHUK R.	
MODELLING SYSTEM RELIABILITY OF FAULT-TOLERANT SYSTEMS WITH THE SEMI-MARKOV STATE SPACE APPROACH	217
AYVAZIAN R.S., AYVAZIAN A.R.	
UNDERUSED INDICATOR WORK COEFFICIENT OF INTERNAL COMBUSTION ENGINES (ICE)	227
GEVORGYAN R.H.	
DISCHARGE HETEROGENEITY PROBLEM SOLVING IN OZONIZERS WITH BARRIER DISCHARGE BY USING CATHODE SURFACE	231
VRUIR SARGSYAN - TO THE 70-TH ANNIVERSARY OF THE BIRTH.....	236