

ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԱԶԳԱՅԻՆ ԱԿԱԴԵՄԻԱՅԻ ԵՎ

ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԱԶԳԱՅԻՆ ՊՈԼԻՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆԻ

ՏԵԴԵԿԱԳԻՐ

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. ԴԱՎԻԹՅԱՆ, Ս.Մ. ՂԱԶԱՐՅԱՆ, Ո.Զ. ՄԱՐՈՒԿՅԱՆ,
ՅՈՒ.Լ. ՍԱՐԳՍՅԱՆ, Վ.Ս. ՍԱՐԳՍՅԱՆ, Ս.Հ. ՄԻՍՈՆՅԱՆ,
Մ.Գ. ՍՏԱԿՅԱՆ, Վ.Ս. ԽԱՉԱՏՐՅԱՆ

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Р.М. МАРТИРОСЯН (главный редактор), А.А. ТЕРЗЯН (зам. глав. редактора), З.К.
СТЕПАНЯН (ответ. 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. MAROUKHYAN, YU.L. SARGSYAN,
V.S. SARKISSYAN, S.H. SIMONYAN, M.G. STAKYAN,
V.S. KHACHATRYAN

Հրատ. խմբագիր՝

ԺԱՆՆԱ ՄԵՅՐԱՆՅԱՆ

Համակարգչային
շարվածքը
և ձեռագրումը՝

ԼԻԼԻԹ

ՄԱՐՏԻՐՈՍՅԱՆԻ

Խմբագիրներ՝

ԼԵՅԼԱ ՍՏԵՓԱՆՅԱՆ
ՆԵԼԼԻ ԱՆԱՆՅԱՆ

© Издательство ГИУА

Известия НАН и ГИУ Армении (сер. техн. наук), 2004

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

ДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ УПРУГИХ МАНИПУЛЯТОРОВ ОБОБЩЕННЫМ МЕТОДОМ НЬЮТОНА-ЭЙЛЕРА

На основе обобщенного метода Ньютона-Эйлера разработан алгоритм решения задач динамического анализа упругих манипуляторов, который позволяет без обращения матрицы масс численным методом интегрировать уравнения движения манипуляторов. Предлагаемый алгоритм значительно сокращает затрачиваемое на интегрирование машинное время, что имеет существенное значение в оптимальном проектировании и управлении робототехнических систем.

Ключевые слова: упругие манипуляторы, динамический анализ, дифференциальные уравнения движения, численное интегрирование.

1. Введение. Приложение метода Ньютона-Эйлера в динамике жестких и упругих манипуляторов [1 - 6] наряду с обеспечением желаемой точности численных результатов позволило существенно повысить скорость решения задач динамического анализа упругих манипуляторов значительной размерности по сравнению с расчетными методиками $O(n^3)$, составленными на базе классического метода Лагранжа [6]. В данной статье описывается алгоритм решения смешанной задачи динамики упругих манипуляторов, построенный на основе обобщенного метода Ньютона-Эйлера с представлением нового метода неявного численного интегрирования уравнений движения в форме Ньютона-Эйлера в соответствии с терминологией и формулировкой работ [2 - 5].

2. Основные положения и постановка задачи. Рассмотрим манипулятор произвольной кинематической цепи (рис. 1), состоящий из n линейно-деформируемых звеньев всевозможной геометрической конфигурации $C_1, C_2, \dots, C_n$, связанных между собой n вращательными или поступательными кинематическими парами, идентифицируемыми логической переменной:

$$\sigma_j = \begin{cases} 0 - \text{пара } j \text{ вращательная} \\ 1 - \text{пара } j \text{ поступательная} \end{cases}, \quad j \in \{1, \dots, n\}. \quad (1)$$

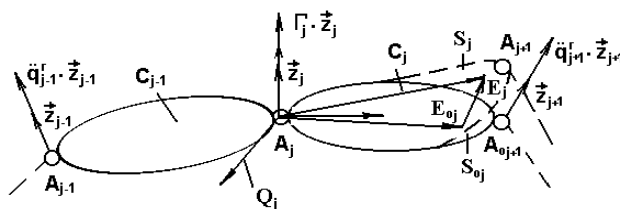


Рис. 1
3

Из теории деформируемого тела известно, что малые линейные и угловые деформации упругого звена C_j определяются перемещениями некоторой точки $E_{0j} \in C_j$ из недеформированной S_{0j} в деформированную конфигурацию S_j (рис. 1) и исчисляются в ж,стко связанной со звеном C_j подвижной системе отсч,та Q_j на основе следующих разложений :

$$\begin{cases} {}^j\bar{u}_j(E_j, t) = \sum_{i=1}^{N_j} {}^j\bar{\Phi}_{dj,i}(E_{0j}) \cdot q_{j,i}^e(t) \\ {}^j\bar{\phi}_j(E_j, t) = \sum_{i=1}^{N_j} {}^j\bar{\Phi}_{rj,i}(E_{0j}) \cdot q_{j,i}^e(t) \end{cases}, \quad j \in \{1, \dots, n\}. \quad (2)$$

Координатные функции Рэлея-Ритца в (2) ${}^j\bar{\Phi}_{dj,i}$ и ${}^j\bar{\Phi}_{rj,i}$, $i = 1, \dots, N_j$; $j \in \{1, \dots, n\}$ (N_j - число интерполяционных вектор-полиномов упругого звена C_j) подчинены векторному равенству

$${}^j\bar{\Phi}_{rj,i}(E_{0j}) = 1/2 \cdot \text{rot}^j {}^j\bar{\Phi}_{dj,i}(E_{0j}), \quad i = 1, \dots, N_j; \quad j \in \{1, \dots, n\} \quad (3)$$

и образуют в точке A_{0j+1} , $j \in \{1, \dots, n\}$ обобщ,нную матрицу форм :

$${}^j\Phi_j = \begin{bmatrix} {}^j\Phi_{dj} \\ {}^j\Phi_{rj} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^j\bar{\Phi}_{dj,1}(A_{0j+1}), {}^j\bar{\Phi}_{dj,2}(A_{0j+1}), \dots, {}^j\bar{\Phi}_{dj,N_j}(A_{0j+1}) \\ {}^j\bar{\Phi}_{rj,1}(A_{0j+1}), {}^j\bar{\Phi}_{rj,2}(A_{0j+1}), \dots, {}^j\bar{\Phi}_{rj,N_j}(A_{0j+1}) \end{bmatrix}, \quad j \in \{1, \dots, n\}. \quad (4)$$

Дифференциальные уравнения движения упругих звеньев манипулятора вместе с кинематическими уравнениями, выражающими в дифференцированной форме связи между звеньями кинематической цепи, объединяются в связанную систему фундаментальных уравнений упругих манипуляторов [5] :

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} {}^j\mathbf{M}_{rj} & {}^j\mathbf{M}_{rej} \\ {}^j\mathbf{M}_{erj} & {}^j\mathbf{M}_{eej} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{q}}_j^r \\ \ddot{\mathbf{q}}_j^e \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} {}^j\bar{\mathbf{B}}_j^{r*} \\ {}^j\bar{\mathbf{B}}_j^{e*} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Gamma_j \\ {}^j\bar{\mathbf{E}}_j \end{bmatrix} \\ {}^j\vec{\mathbf{V}}_j = {}^j\mathbf{T}_{j-1} \cdot {}^{j-1}\vec{\mathbf{V}}_{j-1} + {}^j\mathbf{R}_{j-1} \cdot {}^{j-1}\Phi_{j-1} \cdot \ddot{\mathbf{q}}_{j-1}^e + \dot{\mathbf{q}}_j^r \cdot {}^j\bar{\mathbf{a}}_j \\ {}^j\vec{\mathbf{V}}_j = {}^j\mathbf{T}_{j-1} \cdot {}^{j-1}\vec{\mathbf{V}}_{j-1} + {}^j\mathbf{R}_{j-1} \cdot {}^{j-1}\Phi_{j-1} \cdot \ddot{\mathbf{q}}_{j-1}^e + \dot{\mathbf{q}}_j^r \cdot {}^j\bar{\mathbf{a}}_j + {}^j\bar{\mathbf{h}}_j \end{cases}, \quad j \in \{1, \dots, n\}, \quad (5)$$

где ${}^j\mathbf{M}_{rj}$, ${}^j\mathbf{M}_{rej}$, ${}^j\mathbf{M}_{erj}$ и ${}^j\mathbf{M}_{eej}$ - блочные матрицы масс; ${}^j\bar{\mathbf{B}}_j^{r*}$ и ${}^j\bar{\mathbf{B}}_j^{e*}$ - гироскопические силы; Γ_j - приводные усилия; ${}^j\bar{\mathbf{E}}_j$ - известные функции; ${}^j\vec{\mathbf{V}}_j$ - шестимерный вектор кинематических характеристик звеньев.

3. Алгоритм решения смешанной задачи динамики. Предлагаемый алгоритм решения смешанной задачи динамики упругих манипуляторов без обращения матрицы масс составлен на основе использования процедуры итерационного символического расч, та, нашедшего успешное применение в анализе жестких [4] и упругих [5] манипуляторов. Он включает в себя три последовательно производимых для каждого момента времени $t \in [0, T]$ рекурсивных оборотов.

1-й рекурсивный оборот для $j=1, \dots, n$

требует вычисления следующих матриц ${}^j\mathbf{R}_{j-1}, {}^j\mathbf{T}_{j-1}, {}^j\mathbf{J}_{\pi j}, {}^j\mathbf{J}_{rej}, {}^j\mathbf{J}_{erj}, {}^j\mathbf{J}_{eej}$, векторов ${}^j\bar{\mathbf{C}}_j^r, {}^j\bar{\mathbf{C}}_j^e, {}^j\bar{\mathbf{h}}_j, {}^j\bar{\mathbf{a}}_j$ и постоянной $\tau_j = \tau_j(\Gamma_j)$ при $\chi_j = 0$ [5], что позволяет вслед за этим осуществить кинематический расч, т цепи :

$${}^j\bar{\mathbf{V}}_j = {}^j\mathbf{T}_{j-1} \cdot {}^{j-1}\bar{\mathbf{V}}_{j-1} + {}^j\mathbf{R}_{j-1} \cdot {}^{j-1}\Phi_{j-1} \cdot \bar{\mathbf{q}}_{j-1}^e + \dot{\mathbf{q}}_j^r \cdot {}^j\bar{\mathbf{a}}_j, \quad j = 1, \dots, n, \quad (7)$$

подчиняя (7) инициализациям : ${}^0\bar{\mathbf{V}}_0 = \bar{\mathbf{0}}_6$ и $\bar{\mathbf{q}}_0^e = \bar{\mathbf{0}}_{N_0}$.

2-й рекурсивный оборот для $j=n, \dots, 1$

после произведения инициализации :

$$\left\{ \begin{array}{l} {}^n\mathbf{J}_{\pi n}^* = {}^n\mathbf{J}_{\pi n}; \quad {}^n\mathbf{J}_{ren}^* = {}^n\mathbf{J}_{ren}; \quad {}^n\mathbf{J}_{ern}^* = {}^n\mathbf{J}_{ern}; \quad {}^n\mathbf{J}_{een}^* = {}^n\mathbf{J}_{een} \\ {}^n\bar{\mathbf{C}}_n^{r*} = {}^n\bar{\mathbf{C}}_n^r + {}^n\bar{\mathbf{F}}_{nt}; \quad {}^n\bar{\mathbf{C}}_n^{e*} = {}^n\bar{\mathbf{C}}_n^e + {}^n\Phi_n^T \cdot {}^n\bar{\mathbf{F}}_{nt} \end{array} \right.$$

предусматривает определение вспомогательных инерционных параметров ${}^j\mathbf{J}_{\pi j}^*, {}^j\mathbf{J}_{rej}^*, {}^j\mathbf{J}_{erj}^*, {}^j\mathbf{J}_{eej}^*, {}^j\bar{\mathbf{C}}_j^{r*}$ и ${}^j\bar{\mathbf{C}}_j^{e*}$, $j = (n-1), \dots, 1$ по следующему алгоритмическому циклу :

1. $\mathbf{K}_j = {}^j\mathbf{J}_{\pi j}^* - {}^j\mathbf{J}_{rej}^* \cdot {}^j\mathbf{J}_{eej}^{*-1} \cdot {}^j\mathbf{J}_{erj}^*$; ${}^j\bar{\mathbf{m}}_j = -{}^j\mathbf{J}_{rej}^* \cdot {}^j\mathbf{J}_{eej}^{*-1} \cdot {}^j\bar{\mathbf{C}}_j^{e*} + {}^j\bar{\mathbf{C}}_j^{r*}$.
2. Если $\chi_j = 0$ или $j \neq 1$, то
 $\{\mathbf{G}_j = \mathbf{K}_j \cdot {}^j\mathbf{T}_{j-1}; \quad \mathbf{H}_j = \mathbf{K}_j \cdot {}^j\mathbf{R}_{j-1} \cdot {}^{j-1}\Phi_{j-1}; \quad {}^j\bar{\mathbf{p}}_j = \mathbf{K}_j \cdot {}^j\bar{\mathbf{h}}_j + {}^j\bar{\mathbf{m}}_j\}$.
3. Если $\chi_j = 0$, то $Z_j = \frac{1}{{}^j\bar{\mathbf{a}}_j^T \cdot \mathbf{K}_j \cdot {}^j\bar{\mathbf{a}}_j}$.
4. Если $j \neq 1$ и $\chi_j = 0$, то $\{\mathbf{U}_j = Z_j \cdot \mathbf{K}_j \cdot {}^j\bar{\mathbf{a}}_j \cdot {}^j\bar{\mathbf{a}}_j^T \cdot \mathbf{K}_j; \quad \tilde{\mathbf{G}}_j = \mathbf{G}_j - \mathbf{U}_j \cdot {}^j\mathbf{T}_{j-1};$
 $\tilde{\mathbf{H}}_j = \mathbf{H}_j - \mathbf{U}_j \cdot {}^j\mathbf{R}_{j-1} \cdot {}^{j-1}\Phi_{j-1}; \quad {}^j\tilde{\bar{\mathbf{p}}}_j = {}^j\bar{\mathbf{p}}_j + \mathbf{K}_j \cdot {}^j\bar{\mathbf{a}}_j \cdot (\tau_j - {}^j\bar{\mathbf{a}}_j^T \cdot {}^j\bar{\mathbf{p}}_j) \cdot Z_j\}$.
5. Если $j \neq 1$ и $\chi_j = 1$, то $\{\tilde{\mathbf{G}}_j = \mathbf{G}_j; \quad \tilde{\mathbf{H}}_j = \mathbf{H}_j; \quad {}^j\tilde{\bar{\mathbf{p}}}_j = {}^j\bar{\mathbf{p}}_j + \mathbf{K}_j \cdot {}^j\bar{\mathbf{a}}_j \cdot \ddot{\mathbf{q}}_j^r\}$.
6. Вычисление :

$$\begin{aligned}
{}^{j-1}\mathbf{J}_{\pi j-1}^* &= {}^{j-1}\mathbf{J}_{\pi j-1} + {}^j\mathbf{T}_{j-1}^T \cdot \tilde{\mathbf{G}}_j; & {}^{j-1}\mathbf{J}_{\text{rej-1}}^* &= {}^{j-1}\mathbf{J}_{\text{rej-1}} + {}^j\mathbf{T}_{j-1}^T \cdot \tilde{\mathbf{H}}_j; \\
{}^{j-1}\mathbf{J}_{\text{erj-1}}^* &= {}^{j-1}\mathbf{J}_{\text{erj-1}}^* \cdot \tilde{\mathbf{p}}_j; & {}^{j-1}\mathbf{J}_{\text{eej-1}}^* &= {}^{j-1}\mathbf{J}_{\text{eej-1}} + {}^{j-1}\mathbf{\Phi}_{j-1}^T \cdot {}^j\mathbf{R}_{j-1}^T \cdot \tilde{\mathbf{p}}_j; \\
{}^{j-1}\tilde{\mathbf{C}}_{j-1}^{\text{r}*} &= {}^{j-1}\tilde{\mathbf{C}}_{j-1}^{\text{r}} + {}^j\mathbf{T}_{j-1}^T \cdot \tilde{\mathbf{p}}_j; & {}^{j-1}\tilde{\mathbf{C}}_{j-1}^{\text{e}*} &= {}^{j-1}\tilde{\mathbf{C}}_{j-1}^{\text{e}} + {}^{j-1}\mathbf{\Phi}_{j-1}^T \cdot {}^j\mathbf{R}_{j-1}^T \cdot \tilde{\mathbf{p}}_j.
\end{aligned}$$

3-й рекурсивный оборот для $j=1, \dots, n$

использует результаты вычислений, произведенных в процессе предшествующих расчетных оборотов, в целях определения для подмножества $\{M_1\}$ обобщенных ускорений:

$$\ddot{\mathbf{q}}_j^{\text{r}} = \mathbf{Z}_j \cdot [\tau_j - {}^j\tilde{\mathbf{a}}_j^T \cdot (\mathbf{G}_j \cdot {}^{j-1}\tilde{\mathbf{V}}_{j-1} + \mathbf{H}_j \cdot \tilde{\mathbf{q}}_{j-1}^{\text{e}} + {}^j\tilde{\mathbf{p}}_j)], \text{ если } \chi_j = 0, \quad j \in \{1, \dots, n\}, \quad (8)$$

затем для множества $\{M\}$ - ускорений звеньев, ускорений упругих переменных и, если требуется, внутренних усилий в парах:

$${}^j\tilde{\mathbf{V}}_j = {}^j\mathbf{T}_{j-1} \cdot {}^{j-1}\tilde{\mathbf{V}}_{j-1} + {}^j\mathbf{R}_{j-1} \cdot {}^{j-1}\mathbf{\Phi}_{j-1} \cdot \tilde{\mathbf{q}}_{j-1}^{\text{e}} + \ddot{\mathbf{q}}_j^{\text{r}} \cdot {}^j\tilde{\mathbf{a}}_j + {}^j\tilde{\mathbf{h}}_j, \quad j = 1, \dots, n; \quad (9)$$

$$\tilde{\mathbf{q}}_j^{\text{e}} = -{}^j\mathbf{J}_{\text{eej}}^{*-1} \cdot ({}^j\mathbf{J}_{\text{erj}}^* \cdot {}^j\tilde{\mathbf{V}}_j + {}^j\tilde{\mathbf{C}}_j^{\text{e}*}), \quad j = 1, \dots, n; \quad (10)$$

$${}^j\tilde{\mathbf{F}}_j = \mathbf{K}_j \cdot {}^j\tilde{\mathbf{V}}_j + {}^j\tilde{\mathbf{m}}_j, \quad j = 1, \dots, n \quad (11)$$

с учетом в (8) и (9) инициализаций ${}^0\tilde{\mathbf{V}}_0 = [{}^0\tilde{\mathbf{g}}^T, {}^0\tilde{\mathbf{0}}_3^T]^T$ и $\tilde{\mathbf{q}}_0^{\text{e}} = \tilde{\mathbf{0}}_{N_0}$ и, в заключении, для подмножества $\{M_2\}$ - приводных усилий:

$$\Gamma_j = {}^j\tilde{\mathbf{a}}_j^T \cdot (\mathbf{K}_j \cdot {}^j\tilde{\mathbf{V}}_j + {}^j\tilde{\mathbf{m}}_j) + F_{sj} \cdot \text{Sign}(\dot{\mathbf{q}}_j^{\text{r}}) + F_{vj} \cdot \dot{\mathbf{q}}_j^{\text{r}}, \text{ если } \chi_j = 0, \quad j \in \{1, \dots, n\}, \quad (12)$$

где F_{sj} и F_{vj} - коэффициенты сухого и вязкого трений в парах.

4. Метод численного интегрирования уравнений движения. В целях численного интегрирования уравнений движения упругих манипуляторов воспользуемся общей схемой Ньюмарка:

$$\begin{cases} \bar{\mathbf{x}}_j(t + \Delta t) = \bar{\mathbf{x}}_j(t) + \dot{\bar{\mathbf{x}}}_j(t) \cdot \Delta t + [(0.5 - \beta) \cdot \ddot{\bar{\mathbf{x}}}_j(t) + \beta \cdot \ddot{\bar{\mathbf{x}}}_j(t + \Delta t)] \cdot \Delta t^2, \\ \dot{\bar{\mathbf{x}}}_j(t + \Delta t) = \dot{\bar{\mathbf{x}}}_j(t) + [(0.5 - \gamma) \cdot \ddot{\bar{\mathbf{x}}}_j(t) + \gamma \cdot \ddot{\bar{\mathbf{x}}}_j(t + \Delta t)] \cdot \Delta t, \end{cases} \quad (13)$$

$j = 1, \dots, n; \quad t \in [0, T - \Delta t],$

где $\bar{\mathbf{x}}_j = [\mathbf{q}_j^{\text{r}}, (\tilde{\mathbf{q}}_j^{\text{e}})^T]^T$; β и γ - постоянные ($0 \leq \beta \leq 0.5$ и $0 \leq \gamma \leq 1$). В случае, когда $\beta = \gamma = 0$, система уравнений (13) вырождается в явную схему интегрирования Ньюмарка, использование которой при разрешении уравнений движения упругих механических систем зачастую сопряжено с необходимостью выбора чрезвычайно малого шага интегрирования Δt [6]. В случае же $\beta \neq 0$ или $\gamma \neq 0$ речь идет о неявной схеме

интегрирования Ньюмарка (13) системы нелинейных дифференциальных уравнений движения упругих манипуляторов :

$$\vec{f}(\vec{x}(t + \Delta t), \dot{\vec{x}}(t + \Delta t), \ddot{\vec{x}}(t + \Delta t), t) = \vec{0}_p, \quad p = \sum_{j=1}^n N_j + n; \quad t \in [0, T - \Delta t], \quad (14)$$

где $\vec{x} = [\vec{x}_1^T, \vec{x}_2^T, \dots, \vec{x}_n^T]^T$, которая с уч, том (13) приводится к линеаризованной форме :

$$\vec{F}(\vec{x}^{t+\Delta t}) = \vec{F}[\vec{x}(t + \Delta t), t] = \vec{0}_p, \quad p = \sum_{j=1}^n N_j + n; \quad t \in [0, T - \Delta t]. \quad (15)$$

Решение системы линеаризованных уравнений (15) может быть осуществлено с привлечением метода Ньютона [6] :

$$\vec{x}^{t+\Delta t, k} = \vec{x}^{t+\Delta t, k-1} - \mathbf{J}^{-1}(\vec{x}^{t+\Delta t, k-1}) \cdot \vec{F}(\vec{x}^{t+\Delta t, k-1}), \quad t \in [0, T - \Delta t]; \quad k = 1, 2, \dots, \quad (16)$$

прич, м $\mathbf{J}$ в (16) представляет собой якобиан системы уравнений (15), который, в связи с выбором неявной схемы интегрирования Ньюмарка (13), рассчитывается в виде

$$\mathbf{J} = \mathbf{M} + \gamma \cdot \Delta t \cdot \mathbf{CT} + \beta \cdot \Delta t^2 \cdot \mathbf{KT}, \quad (17)$$

где $\mathbf{M}$ - матрица масс; $\mathbf{CT}$ и $\mathbf{KT}$ - тангенциальные матрицы демпфирования и ж, ст-кости соответственно, компоненты которых определяются выражениями

$$\begin{cases} \mathbf{CT}_{ij} = \frac{\partial f_i}{\partial \dot{x}_j} \\ \mathbf{KT}_{ij} = \frac{\partial f_i}{\partial x_j} \end{cases}, \quad i, j = 1, \dots, \sum_{j=1}^n N_j + n. \quad (18)$$

Точное вычисление якобиана (17) в расчетной формуле метода Ньютона (16) ускоряет процесс сходимости, но предполагает громоздкий расчет тангенциальных матриц (18), особенно, при большом общем числе степеней свободы рассматриваемых систем [6]. С другой стороны, ассимиляция якобиана с матрицей масс манипулятора в (17), будучи оправданной для жестких систем, вызывает серьезные сомнения при наличии в кинематической цепи упругих звеньев [6]. В этой связи представляет особый практический интерес компромиссный подход к преодолению указанных трудностей вычислительного характера, заключающийся в замещении точного выражения якобиана (17) его редуцированным аналогом :

$$\mathbf{J} \approx \text{Diag}_{j=1, \dots, n} ({}^j\mathbf{M}_j + \gamma \cdot \Delta t \cdot {}^j\mathbf{CT}_j + \beta \cdot \Delta t^2 \cdot {}^j\mathbf{KT}_j), \quad j = 1, \dots, n, \quad (19)$$

расч,т которого в контексте представления уравнений движения в форме Ньютона-Эйлера обусловлен минимальными затратами вычислений.

Численная реализация предложенной методики расчета. Рассмотрим плоский двухзвенный манипулятор, представленный на рис. 2. Система начинает движение из горизонтального положения при $q_1^r(0) = q_2^r(0) = 0$ с постоянными угловыми скоростями звеньев ${}^1\bar{\omega}_1(t) \equiv 10 \text{ рад/с}$ и ${}^2\bar{\omega}_2(t) \equiv 0$. Для следующих геометрических и инерционных характеристик:

$$l_1 = l_2 = 0.8 \text{ м}; \quad \boxed{A_2 = 4.0 \cdot 10^{-4} \text{ М}^2};$$

$$E_1 = E_2 = 7.0 \cdot 10^{10} \text{ Н/М}^2; \quad m_1 = m_2 = 2.512 \text{ кг}; \quad I_{z_1} = 5.333 \cdot 10^{-8} \text{ М}^4, \quad I_{z_2} = 1.333 \cdot 10^{-8} \text{ М}^4$$

производим тест функционирования манипулятора в течение полного периода его обращения. Графики линейных деформаций ${}^2\bar{u}_2(A_3)$ представлены на рис. 3 а и б для случаев, когда звено 1 предполагается жестким, а звено 2 - упругим и когда оба звена 1 и 2 полагаются упругими, приняв $\bar{q}_1^e(0) = \bar{q}_2^e(0) = \dot{\bar{q}}_1^e(0) = \dot{\bar{q}}_2^e(0) = 0$, где $N_1 = N_2 = 1$. Программная реализация расчетной методики осуществлена на языке Turbo Pascal, тесты произведены на PC PENTIUM 100 с использованием переменных расширенного типа точности Extended, машинное время подсчета программы ТЕР=5 - 6 с. Результаты численных расчетов сопоставлены с одноименными характеристиками взятого из публикации [7] контрольного примера.

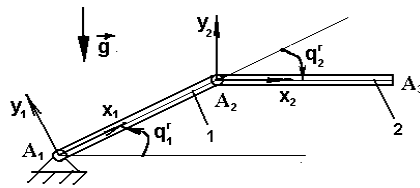
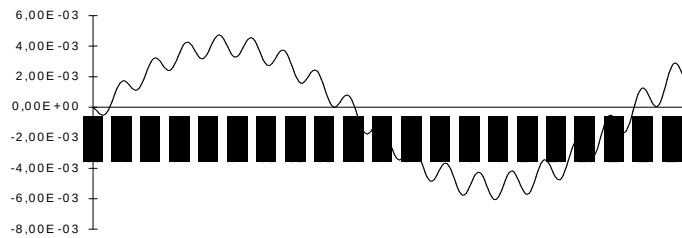
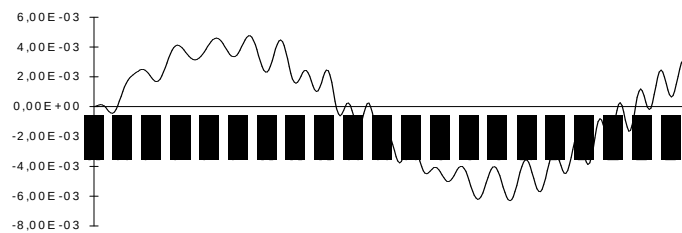


Рис. 2



5. а)



б)

Рис. 3

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Luh J.Y.S., Walker M.W. and Paul R.** On-line computational scheme for mechanical manipulators // ASME Trans. Int. J. Dyn. Sys. Meas. and Control. - 1980. - V. 102, N2. - P. 69 - 76.
2. **Boyer F. and Coiffet P.** Generalization of Newton-Euler model for flexible manipulators // Int. J. Robotic Systems. - 1996. - V. 13, N1. - P. 11 - 24.
3. **Boyer F. and Coiffet P.** Symbolic modeling of a flexible manipulator via assembling of its generalized Newton-Euler model // Int. J. Mechanism and Machines Theory. - 1996. - V. 31, N1. - P. 45 - 56.
4. **Dombre E. and Khalil W.** Modélisation, identification et commande des robots. - Paris, Hermès, 1999.
5. **Boyer F. and Khalil W.** An efficient calculation of flexible manipulator inverse dynamics // Int. J. Robotics Research. - 1998. - V. 17, N3. - P. 282 - 293.
6. **Verlinden O.** Simulation du comportement dynamique de systèmes multicorps flexibles comportant des membrures de forme complexe: Thèse de Doctorat de la Faculté Polytechnique de Mons (Belgique). - 1994. - 222p.
7. **Avello A. and De Jalon J.G.** Dynamics of flexible multibody systems using cartesian co-ordinates and large displacement theory // Int. J. for Numerical Methods in Engineering. - 1991. - V. 32. - P. 1543 - 1563.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 31.10.2003.

ՅՈՒ.Լ. ՍԱՐԳՍՅԱՆ, Կ.Գ. ՍՏԵՓԱՆՅԱՆ, Ն. ԱԶՈՒԶ, Հ.Ա.ԳԵՎՈՐԳՅԱՆ

**ԱՌԱՋԳԱԿԱՆ ՄԱՆԻՊՈՒԼՅԱՏՈՐՆԵՐԻ ԴԻՆԱՄԻԿԱԿԱՆ ՎԵՐԼՈՒԾՈՒԹՅՈՒՆԸ
ՆՅՈՒՏՈՆ - ԷՅԼԵՐԻ ԸՆԴՀԱՆՐԱՅՎԱԾ ՄԵԹՈԴՈՎ**

Նյութոն-Էյլերի ընդհանրացված մեթոդի հիման վրա մշակված է առաձգական մանիպուլյատորների դինամիկական վերլուծության խնդիրների լուծման ալգորիթմ, որը հնարավորություն է ընձեռում առանց զանգվածների մատրիցի հակադարձման, թվային մեթոդով ինտեգրել մանիպուլյատորների շարժման հավասարումները: Առաջարկված ալգորիթմը զգալիորեն կրճատում է ինտեգրման վրա ծախսվող մեքենայական ժամանակը, ինչն էական նշանակություն ունի մանիպուլյացիոն համակարգերի լավարկված նախագծման և կառավարման համար:

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

**DYNAMIC ANALYSIS OF FLEXIBLE MANIPULATORS USING THE
GENERALIZED NEWTON-EULER METHOD**

An efficient computational algorithm for dynamic analysis of elastic manipulators based on the generalized Newton-Euler method is developed. The algorithm enables the numerical integration of motion equations for elastic manipulators without inverting their inertia matrices and reduces considerably the computer time necessary for the integration. This factor is significant for optimum design and control problems of manipulator systems.

Г.А. АРУТЮНЯН

ИЗУЧЕНИЕ СИЛ УДАРА И РЕЗАНИЯ ВДОЛЬ ДЛИНЫ ВРЕЗАНИЯ РЕЗЦА В ЗАГОТОВКУ ПРИ СТРОГАНИИ

Изучена закономерность изменения сил удара и резания вдоль длины врезания резца в обрабатываемую заготовку при строгании. Установлено, что силы $P_{уд}$, $P_{рез}$ и $P_{общ}(P_{уд} + P_{рез})$ изменяются с определенной закономерностью вдоль длины врезания резца, причем в момент удара $P_{общ} = P_{уд}$, а в конце врезания, когда процесс резания стабилизируется, $P_{общ} = P_{рез}$.

Ключевые слова: сила удара, сила резания, длина врезания, величина сближения центров масс.

Для определения силы удара при строгании нами применялась известная формула Герца:

$$P_{уд} = KX_{\max}^{3/2} = K^{2/5} \left[\frac{5}{4} MV^2 \right]^{3/5}, \quad (1)$$

где K – коэффициент, зависящий от материалов соударяющихся тел и начальной кривизны их поверхностей в точке контакта; $X_{\max}$ – величина сближения центров масс соударяющихся тел; M – приведенная масса соударяющихся тел $\left(M = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} \right)$;

m_1 – масса ползуна с динамометром ($m_1 = 584$ кг); m_2 – масса обрабатываемого материала с приспособлением ($m_2 = 135,5$ кг); V – скорость удара.

Полученные данные для двух скоростей удара приведены в таблице.

Отметим, что сила удара затухает не мгновенно, а по длине врезания l в обрабатываемую заготовку. Такой характер изменения силы удара показывает осциллограмма, полученная при наших экспериментах (рис.1).

В связи с вышеизложенным значительный интерес представляет установление закономерности изменения сил удара и резания вдоль длины врезания резца в обрабатываемую заготовку. Важность выявления этой закономерности заключается в том, что виброустойчивость технологической системы и работоспособность резца тесно связаны с характером изменения сил удара и резания именно по длине врезания l .

Таблица

Расчетные значения силы удара

Обрабатываемые материалы	М, кг	$K^{2/5}$	Скорость удара V, м/с (м/мин)			
			0,13 (8,0)		0,6 (36)	
			Сила удара $P_{уд}$, кг		Сила удара $P_{уд}$, кг	
			расч.	эксп.	расч.	эксп.
Железо Армко	110	25,98	72,9	71,5	276,8	277,2
Сталь У8А		26,63	74,7	73,7	283,6	281,1

Станок - гидрофицированный поперечно-строгальный 7М36.

Подача ($S = 0,5$ мм/дв.х), глубина резания ($t=1,0$ мм)

(Экспериментальные значения силы удара приведены в [1]).

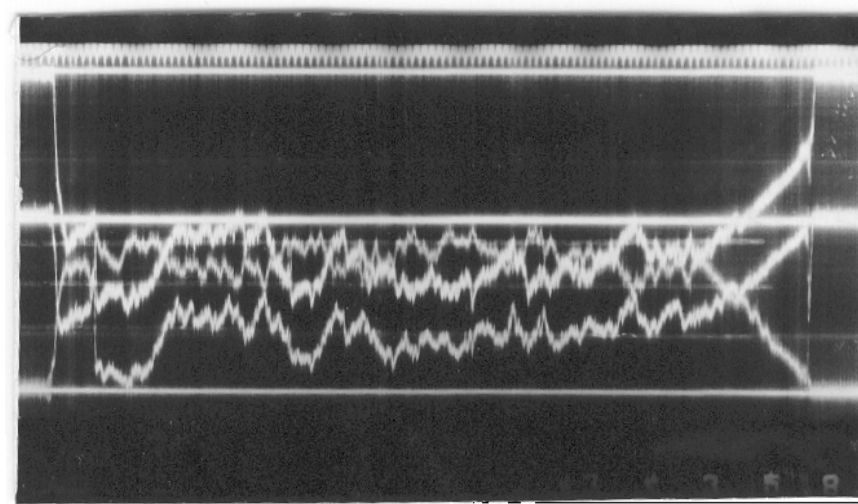


Рис.1. Характер изменения сил удара и резания по длине обрабатываемой заготовки

Примем, что общая сила $P_{общ} (P_{уд} + P_{рез})$ по длине врезания резца l в обрабатываемую заготовку изменяется согласно закономерности

$$P_{общ} = a_1(l-x)^{3/2} + b_1x^{3/2}, \quad (2)$$

где x - величина сближения центров масс соударяющихся тел; a_1, b_1 - коэффициенты.

Такая закономерность справедлива при условии, что во время удара сближение центров x происходит не только в направлении скорости удара, но и в направлении, перпендикулярном скорости удара, т.е. во взаимоперпендикулярных плоскостях. Это подтверждается данными наших опытов: при ударе по длине врезания изменяется также толщина среза [2].

Очевидно, что x - переменная величина, т.е. фактически текущее значение величины сближения центров инерции по длине врезания l .

Примем, что если в формуле Герца величина x имеет показатель $3/2$, то такой же показатель должна иметь величина $(1-x)$ в (2), поскольку, как было отмечено выше, сила удара затухает не мгновенно, а по длине врезания.

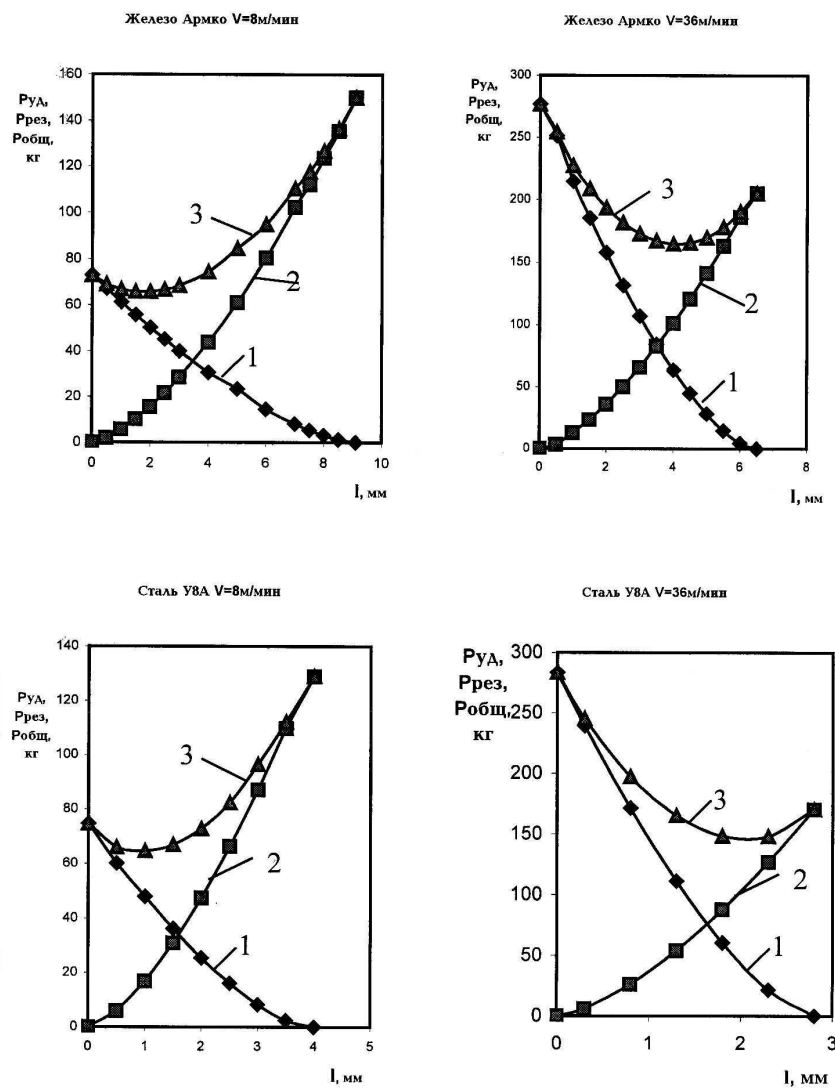


Рис. 2. Значения $P_{уд}$, $P_{рез}$ и $P_{общ}$ при различных расстояниях X_i вдоль длины врезания l : 1 – $P_{уд}$, 2 – $P_{рез}$, 3 – $P_{общ}$

Примем, что такой же показатель должна иметь величина x в (2). Это в основном обусловлено физико-механическими свойствами обрабатываемых материалов. Согласно [3], при обработке сталей инструментами из твердых сплавов и

быстрорежущих материалов силы резания возрастают при увеличении предела прочности сталей. При этом в формулах для определения силы резания величина предела прочности σ_b имеет средний показатель, примерно равный $3/2$. Коэффициенты a_1 и b_1 в (2) для различных скоростей резания определены следующим образом.

Так как при $x = 0$, $x = 1$ $P_{\text{общ}} = P_{\text{уд}}$, $P_{\text{общ}} = P_{\text{рез}}$, то $P_{\text{уд}} = a_1 l^{3/2}$,
 $P_{\text{рез}} = b_1 l^{3/2}$, следовательно,

$$a_1 = P_{\text{уд}} / l^{3/2}, \quad b_1 = P_{\text{рез}} / l^{3/2}.$$

Имея значения a_1 и b_1 для данного обрабатываемого материала, при двух значениях скорости резания нами определены $P_{\text{уд}}$ и $P_{\text{рез}}$ на различных расстояниях от начала удара вдоль длины врезания. Для определения коэффициента a_1 взяты расчетные значения силы удара $P_{\text{уд}}$. Длина врезания l бралась по [4]. Для определения коэффициента b_1 взяты значения главной силы резания, т.е. $P_{\text{рез}} = P_z$. Графики изменения сил $P_{\text{уд}}$, $P_{\text{рез}}$ и общей силы $P_{\text{общ}}$ приведены на рис.2. Как видно, они изменяются по длине врезания с определенной закономерностью. Сила $P_{\text{уд}}$ достигает своего наибольшего значения в начальный момент удара. Далее она постепенно уменьшается и равняется нулю в конце длины врезания, когда процесс полностью стабилизируется. С этого момента резец начинает снимать стружку, соответствующую номинальному сечению среза.

Сила резания $P_{\text{рез}}$ изменяется по обратной закономерности. В момент удара она равна нулю, т.к. при этом стружка еще не образуется. По мере движения резца она увеличивается, достигая своего наибольшего значения после того, как инструмент полностью врезается в заготовку. С этого момента колебательный процесс системы затухает, а ширина и толщина среза равняются их номинальным значениям [2].

Следовательно, в момент удара $P_{\text{общ}} = P_{\text{уд}}$, а в конце врезания, когда процесс резания стабилизируется, $P_{\text{общ}} = P_{\text{рез}}$. Графики показывают также, что чем тверже обрабатываемый материал и выше скорость резания и, следовательно, сила удара, тем быстрее протекает процесс затухания колебаний.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Касьян М.В., Арутюнян Г.А., Багдасарян Г.Б.** О связи силы удара с характером изменения сил резания при строгании // Изв. АН АрмССР. Сер. ТН. - 1970. - Т. XXIII, N 1. - С.212-217.
2. **Касьян М.В., Минасян Г.С., Багдасарян Г.Б., Арутюнян Г.А.** Об одном явлении при прерывистом резании // Изв. АН АрмССР. Сер. ТН. - 1970. - Т. XXIII, N3. - С.3-8.
3. **Бобров В.Ф.** Основы теории резания металлов. - М. Машиностроение, 1975. - 343 с.
4. **Багдасарян Г.Б.** Механика образования переменного сечения стружки при строгании // Физика резания металлов. Вып.1. Изв. АН АрмССР. - Ереван. - 1971. - С.45-51.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 28.06.2002.

Հ.Հ. ՀԱՐՈՒԹՅՈՒՆՅԱՆ

ՌԱՆԴՄԱՆ ԳՈՐԾԸՆԹԱՑՈՒՄ ՀԱՐՎԱԾԻ ԵՎ ԿՏՐՄԱՆ ՈՒԺԵՐԻ ՈՒՍՈՒՄՆԱՍԻՐՈՒԹՅՈՒՆԸ ՆԱԽԱՊԱՏՐԱՍՏՎԱԾՔԻ ՄԵՋ ԿՏՐԻՉԻ ՆԵՐԽՐՄԱՆ ԵՐԿԱՅՆՈՒԹՅԱՄԲ

Ուսումնասիրված է ռանդման գործընթացում հարվածի և կտրման ուժերի փոփոխության օրինաչափությունը մշակվող նախապատրաստվածքում կտրիչի ներխրման երկայնությամբ: Բացահայտված է, որ հարվածի P_h , կտրման $P_{կտր}$ և ընդհանուր $P_{ընդ} (P_h + P_{կտր})$ ուժերը կտրիչի ներխրման երկայնությամբ փոփոխվում են որոշակի օրինաչափությամբ, ընդ որում՝ հարվածի պահին $P_{ընդ} = P_h$, իսկ ներխրման վերջում (երբ գործընթացը կայունանում է) $P_{ընդ}$ ուժը հավասարվում է $P_{կտր}$ ուժին:

H.H. HAROUTYUNYAN

THE STUDY OF IMPACT AND CUTTING FORCES ALONG THE CUTTING-IN LENGTH OF THE TOOL INTO THE STOCK IN PLANING

The regularity of impact and cutting forces variation along the cutting-in length of the tool into the work in the process of planing has been studied. It was established that P_{Imp} , P_{Cut} , and $P_{Gen} (P_{Imp} + P_{Cut})$ vary with a definite regularity along the cutting-in length of the tool, P_{Gen} being equal to P_{Imp} at the moment of impact, and at the end of cutting-in when the cutting process is stabilized, the force P_{Gen} becomes equal to P_{Cut} .

М. Г. САРКИСЯН

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПОРОД РАЗРУШЕНИЮ АЛМАЗНЫМ РАБОЧИМ ОРГАНОМ

Рассматриваются вопросы взаимодействия алмазного рабочего органа с породой с учетом влияния масштабного фактора на прочность рабочей среды. По выведенной формуле при определении суммарной силы разрушения динамический характер взаимодействия учитывается динамической микропрочностью породы.

Ключевые слова: порода, алмазное зерно, ядро.

В соответствии с расчетной схемой взаимодействия алмазного зерна с породой с образованием уплотненного ядра [1,2] сила, нормальная к контактной площадке зерна АВ (рис. 1), может быть определена по формуле

$$N = b_0 \int_0^{\pi} \sigma_{\partial} \cdot dl = \pi b_0 r \sigma_{\partial}, \quad (1)$$

где b_0 - ширина отрываемого элемента породы (ширина пропила); r - радиус полусферы уплотненного ядра; σ_{∂} - динамическое нормальное напряжение, которое возникает в среде при вдавливании ядра в породу со скоростью, равной скорости рабочего органа.

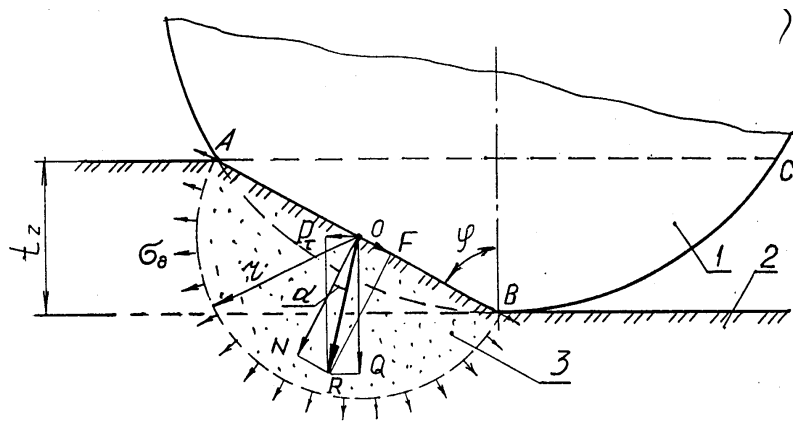


Рис 1. Принципиальная схема взаимодействия алмазного зерна с породой:
1 – алмазное зерно; 2 – рабочая среда; 3 – уплотненное ядро

Предварительно принимаем, что взаимодействие зерна с породой происходит по наклонной площадке АВ шириной b_0 . Тогда средняя площадь контакта S_0 будет равна $S_0=2rb_0$. При этом формула (1) принимает вид

$$N = \frac{\pi S_0}{2} \sigma_{\partial} . \quad (2)$$

Рассмотрим алмазное зерно, имеющее форму какой-либо выпуклой поверхности. В большинстве случаев форму режущей части зерна принимают в виде шара или эллипсоида [6].

Для случая шарообразной режущей поверхности задача определения поверхности контакта зерна с породой значительно облегчается. При этом контакт происходит по половине поверхности сферического сегмента ABC (рис.1), а площадь контакта определяется по формуле

$$S_k = \frac{\pi r_z^2 (tg^2 \varphi + 1)}{2} , \quad (3)$$

где φ - условный передний угол алмазного зерна.

Равнодействующая сила, воздействующая на породу от одного алмазного зерна, будет

$$R = \frac{N}{\cos \alpha} = \frac{\pi S_k}{2 \cos \alpha} \sigma_{\partial} , \quad (4)$$

где α - угол трения между алмазным зерном и обрабатываемой породой.

Так как порода раздавливается по глубине внедрения алмазного зерна t_z , то разрушение происходит под действием тангенциальной составляющей P_{τ} равнодействующей силы R:

$$P_{\tau} = R \cos(\varphi + \alpha) . \quad (5)$$

Подставляя значение R из выражения (4) в (5), получим

$$P_{\tau} = \frac{\pi S_k \sigma_{\partial} \cos(\varphi + \alpha)}{2 \cos \alpha} . \quad (6)$$

С учетом (3), принимая $S_0 \approx S_k$, формула (6) для определения разрушающей силы одним алмазным зерном получает вид

$$P_{\tau} = \frac{\pi^2 \cdot t_z^2 \cdot \sigma_{\partial} \cdot (tg^2 \varphi + 1) \cdot \cos(\varphi + \alpha)}{4 \cos \alpha} . \quad (7)$$

Учитывая, что разработка туфов алмазным рабочим органом осуществляется с большими скоростями (50 м/с и более), разрушение туфовых пород рассматривается с точки зрения волновой теории деформации с целью определения динамического предела прочности среды на сжатие (динамической микропрочности) σ_{∂} . Согласно теории [3], предел прочности на сжатие, входящий в зависимость (7), определяется по следующей упрощенной формуле:

$$\sigma_{\partial} = (1,36...1,6) \sigma_{ст} , \quad (8)$$

где $\sigma_{ст}$ - предел прочности на статическое сжатие образцов породы.

При определении прочности пород на сжатие важно учитывать масштабный фактор.

Вопросу влияния масштабного фактора на прочностные показатели материалов уделялось достаточно внимания [7,8]. В этих работах прочностные свойства материалов связываются с суммарным действием двух масштабных факторов - объемного и поверхностного, связанных с внутренним строением материала, в частности, с трещиноватостью, структурой и т.д. Основная тенденция изменения прочности связана для большинства пород с объемным фактором. Однако имеются данные, где превалирующими являются другие факторы, приводящие к уменьшению прочности с уменьшением размеров. Именно таким фактором для туфовых пород является их пористость. Результаты испытаний образцов туфа арктического и ереванского типов на одноосное сжатие при изменении их размеров (ℓ) приведены на рис.2.

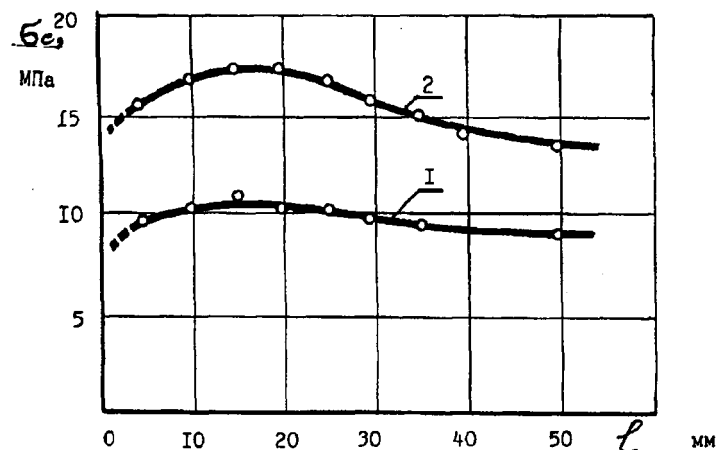


Рис 2. Влияние масштабного фактора на статическую прочность туфов при одноосном сжатии: 1 - туф арктического типа; 2 - туф ереванского типа

Как показывают эксперименты, точное определение прочности породы со значительной пористостью на одноосное сжатие по образцам с размерами менее 5 мм связано с рядом технических трудностей, из-за чего кривые масштабного фактора (рис.2) ограничены в области малых размеров до 5 мм с экстраполяцией на более мелкие размеры. Как следует из вышеизложенного, с уменьшением размеров должно происходить и дальнейшее снижение прочности в пористых материалах, т. е. при алмазном разрушении, где снимается небольшой слой, необходимо учитывать микропрочность породы, которую можно определить по графику, полученному методом экстраполяции на более мелкие размеры.

Так как туфовые породы обладают сравнительно малой прочностью, то в расчет принимаем нижний предел коэффициентов $\sigma_{ст}$, равный 1,4. Тогда с учетом зависимости (8) формула (7) принимает вид

$$P_{\tau} = \frac{7\pi^2 t_z^2 (tg^2 \varphi + 1) \cos(\varphi + \alpha)}{20 \cos \alpha} \sigma_{ст}. \quad (9)$$

Имея разрушающую силу одним алмазным зерном, можно определить суммарную силу разрушения породы алмазным дисковым рабочим органом по следующей зависимости:

$$P_{\Sigma\tau} = K_u Z_{\Pi} F_K P_{\tau} = \frac{K_u \varphi_K D b Z_{\Pi} P_{\tau}}{2}, \quad (10)$$

где K_u - коэффициент, учитывающий прерывистость алмазоносной части на цилиндрической поверхности дискового рабочего органа; Z_{Π} - количество обнаженных зерен на единице рабочей поверхности инструмента [4,5]; F_K - площадь контакта инструмента с породой; φ_K - угол дуги резания (рис.3); b - ширина фрезерования; D - диаметр рабочего органа.

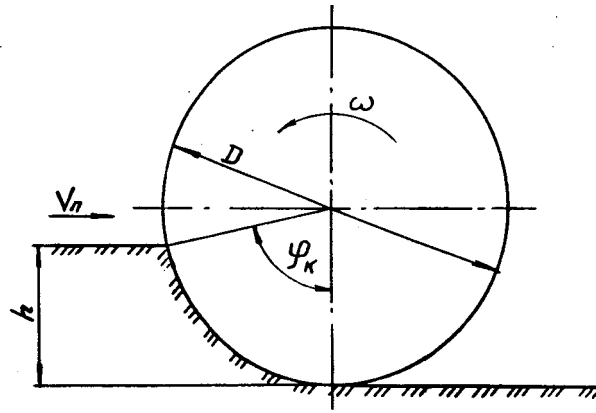


Рис. 3. Схема резания алмазным дисковым рабочим органом: φ_K - угол дуги резания; D - диаметр рабочего органа; ω - угловая скорость; V_{Π} - скорость подачи; h - глубина резания

$$P_{\Sigma\tau} = \frac{7\pi^2 K_u Z_{\Pi} \varphi_K D b t_z^2 (\operatorname{tg}^2 \varphi + 1) \cos(\alpha + \varphi)}{40 \cos \alpha} \sigma_{\text{ст}}. \quad (11)$$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Тер-Азарьев И.А., Саркисян М.Г.** Механизм разрушения горных пород алмазным зерном // Техника строительства: Академия строительства Украины. – 1999. – № 4. – С. 28-31.
2. Механическое разрушение горных пород комбинированным способом / **А.Ф. Кичигин, С. Н. Игнатов** и др. – М.: Недра, 1972. – 256 с.
3. **Ветров Ю. А., Баладинский В. Л.** Машины для специальных земляных работ. – Киев: Вища школа, 1980. – 192 с.
4. **Тер-Азарьев И. А., Саркисян М. Г.** Критериальные условия удаления продуктов разрушения из рабочей зоны при алмазной обработке // Горн., строит., дор. и мелиор. машины: Респ. межвед. научн.-техн. сб. - Киев, 1992. – Вып. 47. – С.17-21.
5. Абразивная и алмазная обработка материалов: Справочник / Под ред. **А.Н. Резникова**. – М.: Машиностроение, 1977. – 322 с.
6. Применение алмазного и твердосплавного инструмента в строительных машинах / **В.Л. Баладинский, В. Ф. Баранников**. – М., 1986. – 59 с.
7. Об исследованиях масштабного фактора в работах по горному давлению / **М. И. Койфман** // Механические свойства горных пород: Сб. научн. тр./ ИГД. – М., 1963. – С.105 – 113.
8. **Ягодкин Г.И., Мохамед М. П., Кунтыш М. Ф.** Прочность и деформируемость горных пород в процессе их нагружения. – М.: Наука, 1971. – 146 с.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 26.06.2002.

Մ.Գ. ՍԱՐԳՍՅԱՆ

ԱԼՄԱՍՏԱՅԻՆ ԱՇԽԱՏԱՆՔԱՅԻՆ ՕՐԳԱՆՈՎ ԱՊԱՐԱՏԵՐԻ ՔԱՅՔԱՅՄԱՆ ԴԻՄԱԴՐՈՒԹՅԱՆ ՈՐՈՇՈՒՄԸ

Դիտարկված է ապարի և ալմաստային աշխատանքային օրգանի փոխազդեցությունը՝ աշխատանքային միջավայրի ամրության վրա մասշտաբային գործոնի ունեցած ազդեցության հաշվառմամբ: Ստացված բանաձևով քայքայման գումարային ուժի որոշման դեպքում փոխազդեցության դինամիկական բնույթը հաշվի է առնվում ապարի դինամիկական միկրոամրությամբ:

M.G. SARKISSYAN

ROCK RESISTANCE DETERMINATION TO DESTRUCTION BY DIAMOND OPERATING ORGAN

Diamond operating organ interaction problems with the rock considering scale factor influence on strength of working environment are viewed. According to the deduced formula for determining the total destruction force, the dynamic character of interaction is taken into account by dynamic rock microstrength.

Р.С. АЙВАЗЯН

О ВОЗМОЖНОСТЯХ ПРИМЕНЕНИЯ КОМБИНИРОВАННОГО НАДДУВА НА АВТОТРАКТОРНЫХ ДИЗЕЛЯХ

Изучены возможности применения комбинированного наддува на автотракторных дизелях. Проведены экспериментальные исследования комбинированного наддува на автотракторном дизеле Д-145Т, на основе которых представлены оптимальные размеры патрубков от воздухоочистителя к турбокомпрессору.

Ключевые слова: комбинированный наддув, автотракторный дизель, эксперимент, патрубок.

Необходимость получения оптимальных показателей современных дизельных силовых агрегатов в зависимости от изменения внешнего сопротивления привела к созданию многоступенчатых трансмиссий различных типов и конструкций. Однако такие трансмиссии конструктивно сложны, дороги, имеют значительную массу, и управление ими требует высокой квалификации водителей. Более прогрессивную тяговую характеристику можно получить усовершенствованием двигателя внутреннего сгорания. Двигатель, имеющий большой коэффициент приспособляемости и соответственно высокий запас крутящего момента, автоматически обеспечивает плавное преодоление внешнего сопротивления при минимальном числе переключения передач. Однако современные дизели обеспечивают запас крутящего момента лишь на 15...18%, что не соответствует вышеуказанным требованиям, даже при большом числе передач трансмиссии. Это объясняется тем, что обычная система турбонаддува при низких частотах вращения коленчатого вала не обеспечивает возрастающую потребность дизеля в воздухе для бездымного сгорания.

Одним из способов улучшения коэффициента приспособляемости турбонаддувного дизеля является перепуск выпускных газов, минуя турбину, или перепуск воздуха за компрессором при высоких частотах вращения, т.е. при применении регулируемых турбокомпрессоров [1]. При этом часть энергии выпускных газов и воздуха не используется, что отрицательно влияет на мощностные показатели дизеля и его топливную экономичность. С другой стороны, этот способ не нашел широкого применения на практике из-за его сложности и недостаточной надежности.

Решение указанных задач может дать комбинированная система наддува. В этом случае дизель с турбонаддувом должен быть оборудован впускным коллектором с подводящими патрубками, подобранными так, что на режиме максимального крутящего момента осуществляется интенсивный динамический наддув вследствие резонанса волн во впускной системе.

Для обеспечения хорошего наполнения двигателя в некоторых случаях применяют впускной трубопровод с большим поперечным сечением. Однако, кроме

уменьшения сопротивления впускной системы, одновременно происходит также изменение амплитуд и фазовых состояний гармоник колебаний перед впускным клапаном, что при определенных условиях может привести к уменьшению коэффициента наполнения.

Экспериментально показано, что большому диаметру впускного трубопровода соответствует его большая оптимальная длина. Выбором соответствующей длины можно настроить впускной трубопровод на любой рабочий режим двигателя по частоте вращения, а изменением диаметра трубопровода – перемещать область настройки впускной системы. Если последняя настроена на режим максимального крутящего момента, то увеличение диаметра вызывает повышение коэффициента наполнения на режиме максимальной частоты вращения (2).

Опыты, проводимые на турбонаддувном дизеле воздушного охлаждения Д-145Т, заключались в снятии нагрузочных характеристик при различных трубопроводах от воздухоочистителя к компрессору турбокомпрессора ТКР-8,5. Окончательному сравнительному испытанию подверглись три трубопровода, имеющие соответственно длину 740, 510 и 200 мм.

Оценка показателей двигателя производилась по среднему эффективному давлению P_e и удельному расходу топлива q_e на скоростных режимах 1400, 2000 и 2200 мин⁻¹.

Результаты испытаний показали, что в одном и том же впускном трубопроводе двигателя при различных частотах вращения и коленчатого вала возникают резонансные явления с различной интенсивностью. Вследствие этого величины q_e при постоянном P_e и при различных трубопроводах отличаются друг от друга.

На рис.1 приведена зависимость $g_e = f(P_e)$, снятая при впускных трубопроводах вышеуказанных размеров при частоте вращения 1400 мин⁻¹, соответствующей режиму максимального крутящего момента.

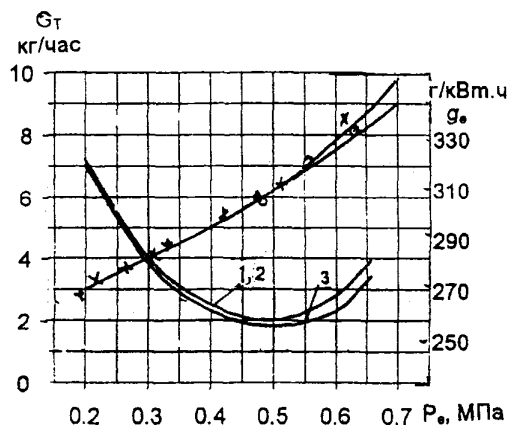


Рис. 1. Сравнительные нагрузочные характеристики дизеля Д-145Т при различных впускных патрубках $n=1400$ мин⁻¹, 1 -+ - $L=740$ мм, 2 - о - $L=510$ мм, 3 -х - $L=200$ мм

Разница q_e в среднем для различных вариантов трубопроводов составляет 4,1 г/кВт.ч. Улучшение экономичности дизеля Д-145Т связано с оптимальной длиной впускного патрубка $L=200$ мм. При этом диаметр патрубка был принят равным штатному.

На эффективность динамического наддува отрицательно влияют такие факторы, как острые кромки, косой срез, уменьшение проходного сечения, близко расположенный к входу турбокомпрессора воздушный фильтр. Отдельные участки трубопровода, например, длина участка разветвлений от впускного клапана, оказывают неодинаковое влияние на коэффициент наполнения. На наполнение цилиндров влияют также соединительные отверстия, введенные во впускных трубопроводах. Это конструктивное изменение приводит к снижению амплитуд колебаний давлений в трубопроводах, уменьшает гидравлические потери в системе впуска и среднее разрежение в трубопроводе. Воздействие этих факторов приводит к увеличению коэффициента наполнения при высоких скоростях и его уменьшению при низких и средних скоростных режимах. Поэтому при создании схемы комбинированного наддува их необходимо учитывать.

Динамический наддув положительно влияет на условные механические потери, которые выражаются уменьшением одной из основных составляющих этих потерь, т.е. насосных потерь. Это связано с уменьшением затрат мощности на осуществление насосных ходов из-за увеличения скорости воздуха, поступающего в цилиндры двигателя.

На рис.2 приведена зависимость $P_{мп} = f(P_k/P_r)$, где $P_{мп}$ – общие механические потери в двигателе при частоте вращения коленчатого вала, равной 1400 мин^{-1} ; P_k – давление наддува; P_r – противодавление перед турбиной турбокомпрессора.

Таким образом, при комбинированном наддуве увеличение P_k приводит к росту отношения P_k/P_r , следовательно, и понижению $P_{мп}$.

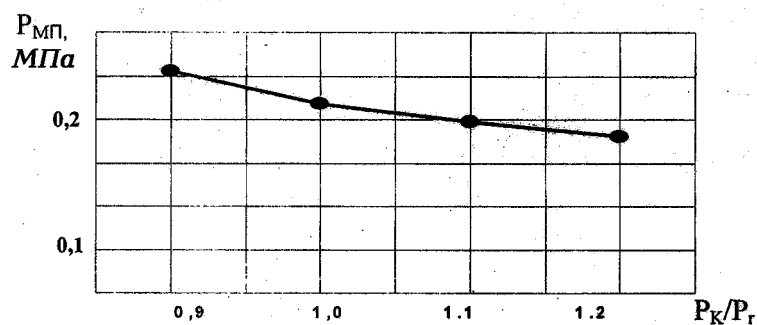


Рис.2. Зависимость $P_{мп} = f(P_k/P_r)$ при $n = 1400 \text{ мин}^{-1}$

Экспериментальный подбор геометрических размеров впускной системы комбинированного наддува, обеспечивающий максимально возможное увеличение наполнения, сложен и трудоемок. Однако эту работу можно упростить применением метода математического планирования эксперимента и ЭВМ.

Эксперименты, проведенные на различных двигателях, показали, что колебательные процессы во впускной системе не зависят от состава смеси и исследования процесса газообмена, а подбор геометрических параметров системы динамического наддува можно проводить при прокручивании двигателя с отключенной подачей топлива. При этом эффективность динамического наддува можно оценить величиной давления конца сжатия или определением расхода воздуха через двигатель.

Метод прокручивания с отключенной подачей топлива позволяет упростить проведение эксперимента, повысить точность измерений и достоверность полученных результатов.

Таким образом, на основании вышеизложенного можно прийти к следующим выводам:

- комбинированный наддув по сравнению с другими методами улучшения приспособляемости дизеля позволяет увеличить максимальный крутящий момент без изменения конструкции турбокомпрессора;

- комбинированный наддув наиболее целесообразно применять на дизелях тяжелых грузовиков и тракторов, где возможно увеличение коэффициента приспособляемости, снижение удельного расхода топлива, сокращение числа переключений передач и обеспечение благоприятного теплового режима при больших нагрузках.

Обобщая результаты публикаций ранее проведенных работ в области двигателей с комбинированной системой наддува, можно отметить отсутствие в них информации по ряду принципиальных вопросов, от решения которых зависят эксплуатационные качества двигателей. В частности, не приведены данные о влиянии данного способа наддува на тепловую и механическую напряженность деталей двигателя.

Учитывая ряд достоинств комбинированного наддува, необходимо провести исследование и испытание по созданию эффективного комбинированного наддува применительно к дизелям автотракторного типа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Взоров Б.А., Мордухович М.И.** Форсирование тракторных двигателей. - М.: Машиностроение, 1985. – 210 с.
2. **Чарный И.Д.** Основы газовой динамики. - М.: Машиностроение, 1961. – 225 с.
3. **Байков Б.П., Бордуков В. Г.** и др. Турбокомпрессоры для наддува дизелей. - М.: Машиностроение, 1975.- 195 с.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 20.06.2002.

Ռ.Ս. ԱՅՎԱԶՅԱՆ ՀԱՍՄԱՆՑՎԱԾ ՆԵՐՄՂՄԱՆ ԿԻՐԱՌՄԱՆ ՀՆԱՐԱՎՈՐՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԸ ԱՎՏՈՏՐԱԿՏՈՐԱՅԻՆ ԴԻԶԵԼՆԵՐՈՒՄ

Ուսումնասիրվել են տուրբոներմոմով դիզելների վրա համակցված ներմղման կիրառման հնարավորությունները: Տուրբոներմոմով Ժ-145T դիզելի վրա կատարվել են փորձարարական աշխատանքներ, որոնց արդյունքում սահմանվել է օդազտիչից դեպի տուրբոկոմպրեսոր տանող խողովակաշարի լավարկված չափերի ընտրություն:

R. S. AIVAZYAN ON POSSIBILITIES OF COMBINED SUPERCHARGING APPLICATION ON AUTOTRACTOR DIESEL ENGINES

Combined supercharging application possibilities of Diesel engines on autotractors are studied. Experimental investigations of combined supercharging on Diesel D-145T autotractors and optimum branch pipe sizes from the air purifier to the turbocompressor Diesel D-145T are fixed.

З.А. БЕЛЛУЯН

МЕТОДИКА РАСЧЕТА НАДЕЖНОСТИ ПОДШИПНИКОВЫХ УЗЛОВ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

Приводятся методы расчета надежности подшипниковых узлов синхронных генераторов, учитывающие их конструкторско-технологические и эксплуатационные особенности, усталостное разрушение подшипника, потери свойств смазки, отклонения величин зазора и перекоса угла наклона. Проведено сравнение расчетных данных с данными эксплуатации.

Ключевые слова: надежность, усталостное разрушение, смазка, зазор, перекос, сравнение, эксплуатация.

Анализ многочисленных исследований показывает, что надежность подшипниковых узлов зависит от состояния смазки, конструкторско-технологических неточностей, скорости вращения и режима нагрузки [1].

Вероятность безотказной работы подшипникового узла синхронных генераторов определяется по формуле [1,2]

$$P_{\text{под}}(t) = P_{\text{ув}}(t) \cdot P_{\text{см}}(t) \cdot P(g_{\text{мин}} \leq g \leq g_{\text{макс}}) \cdot P(\varphi \leq \varphi_{\text{макс}}), \quad (1)$$

где $P(g_{\text{мин}} \leq g \leq g_{\text{макс}})$, $P(\varphi \leq \varphi_{\text{макс}})$, $P_{\text{ув}}(t)$ и $P_{\text{см}}(t)$ - соответственно вероятности безотказной работы, обусловленные отклонениями величин зазора и перекоса, усталостным разрушением подшипника и потерями свойств смазки.

Исследования, проведенные для электрических машин, показали, что для синхронных генераторов с частотой вращения до 3000 об/мин и массой ротора m (400 кг значения $P(g_{\text{мин}} \leq g \leq g_{\text{макс}})$ и $P(\varphi \leq \varphi_{\text{макс}})$ колеблются от 0,97 до 0,99, поэтому при расчете надежность можно принять равной 1. Тогда формула (1) примет вид

$$P_{\text{под}}(t) = P_{\text{ув}}(t) \cdot P_{\text{см}}(t). \quad (2)$$

Для электрических машин с частотой вращения выше 3000 об/мин и для машин постоянного тока с массой ротора $m \geq 1000$ кг вероятность безотказной работы определяется формулой (1) и все составляющие имеют одинаковое значение, что необходимо учесть при расчете.

На величину рабочего зазора подшипника влияют: характер посадки внутреннего и наружного колец подшипника на вал и в корпус; величина углового смещения колец подшипника; перепад температуры между наружным и внутренним кольцами.

1. Вероятность безотказной работы, обусловленная отклонением величины радиального зазора, определяется по формуле [1,2]

$$P(g_{\min} \leq g \leq g_{\max}) = \Phi \left[\frac{g_{\max} - \bar{m}(g_p)}{\sigma_{\text{др}}} \right] - \Phi \left[\frac{g_{\min} - \bar{m}(g_p)}{\sigma_{\text{др}}} \right], \quad (3)$$

где $g_{\min}$ и $g_{\max}$ - величины минимального и максимального допустимых зазоров подшипника в установившемся режиме его работы ($g_{\min} = 3 \text{ мкм}$, $g_{\max}$ - согласно [2,3]); $\bar{m}(g_p)$ - математическое ожидание внутреннего зазора подшипника.

Математическое ожидание радиального зазора определяется в виде

$$\bar{m}(g_p) = \bar{m}(g_i) - \bar{m}(\Delta g_n) - \bar{m}(\Delta g_t) + \bar{m}(\delta_r), \quad (4)$$

$$\bar{m}(g_i) = (g_{\text{н.макс}} + g_{\text{н.мин}}) / 2, \quad (5)$$

где $g_{\text{н.макс}}$ и $g_{\text{н.мин}}$ - максимальный и минимальный наружные зазоры подшипника.

Величина $\bar{m}(\Delta g_n)$ определяется по формуле

$$\bar{m}(\Delta g_n) = \bar{m}(\Delta g_{\text{пв}}) + \bar{m}(\Delta g_{\text{пн}}), \quad (6)$$

где $\bar{m}(\Delta g_{\text{пв}})$ и $\bar{m}(\Delta g_{\text{пн}})$ - математические ожидания величин уменьшения зазора от посадочного натяга внутреннего и наружного колец, равные

$$\bar{m}(\Delta g_{\text{пв}}) = \left[\frac{1}{2} (H_{\text{в.наиб}} + H_{\text{в.наим}}) - (\Delta H_{1\text{в}} + \Delta H_{2\text{в}}) \right] \frac{d_1}{d}, \quad (7)$$

$$\bar{m}(\Delta g_{\text{пн}}) = \left[\frac{1}{2} (H_{\text{к.наиб}} + H_{\text{к.наим}}) - (\Delta H_{1\text{к}} + \Delta H_{2\text{к}}) \right] \frac{D}{D_1}. \quad (8)$$

Здесь $H_{\text{в.наиб}}$, $H_{\text{в.наим}}$, $H_{\text{к.наиб}}$, $H_{\text{к.наим}}$ - соответственно наибольшие и наименьшие величины натягов в соединениях подшипник-вал и подшипник-корпус по таблицам посадок [1,2]; $\Delta H_{1\text{в}}$, $\Delta H_{2\text{к}}$ - соответственно изменение натяга вследствие уменьшения высоты неровностей R_z при посадке подшипника на вал и в корпус; $\Delta H_{2\text{в}}$, $\Delta H_{1\text{к}}$ - соответственно изменение натяга при нагреве элементов подшипника в соединениях подшипник-вал и подшипник-корпус; d, d_1 - соответственно внутренний и наружный диаметры внутреннего кольца подшипника; D, D_1 - соответственно наружный и внутренний диаметры наружного кольца подшипника.

Математическое ожидание величины изменения радиального зазора подшипника от перепада температур между внутренним и наружным кольцами определяется в виде [1]

$$\bar{m}(\Delta g_t) = \alpha_T \cdot d_o \cdot \bar{m}(\Delta t), \quad (9)$$

где α_T - коэффициент линейного температурного расширения; d_o - средний диаметр подшипника; $\bar{m}(\Delta t)$ - математическое ожидание передачи температур между кольцами.

Математическое значение изменения радиального зазора подшипника от деформации под нагрузкой определяется в виде [1,2]

$$\overline{m}(\delta_r) = \overline{m}(\delta_{r'}) + \overline{m}(\delta_{r''}). \quad (10)$$

Значение $\overline{m}(\delta_{r'})$ определяется по формуле

$$\overline{m}(\delta_{r'}) = \beta_r \cdot \delta_{r_0} - \overline{m}(g_r) \cdot 1/2, \quad (11)$$

где β_r - коэффициент, учитывающий величину натяга или зазора в подшипнике; δ_{r_0} - радиальная податливость (деформация) наиболее нагруженного тела качения при нулевом зазоре; $\overline{m}(g_r)$ - математическое ожидание зазора подшипника после посадки его на вал.

Величина δ_{r_0} для радиальных шарикоподшипников определяется в виде [1,2]

$$\delta_{r_0} = 5,85 \cdot \left(\frac{F_r}{i \cdot z} \right)^{2/3} \cdot \frac{1}{D_T^{1/3}}, \quad (12)$$

где F_r - радиальная нагрузка, кгс; D_T - диаметр тел качения, мм; z - число тел качения в одном подшипнике; i - число рядов тел качения.

Значение коэффициента β определяется согласно [1,2].

Значение $\overline{m}(\delta_{r''})$ определяется по формуле [1,2]

$$\overline{m}(\delta_{r''}) = \frac{4 \cdot F_r \cdot \overline{m}(K)}{\pi d B} \cdot \left(1 + \frac{d}{D} \right), \quad (13)$$

где B - ширина подшипника;

$$\overline{m}(K) = 0,5(K_{\min} + K_{\max}).$$

Для шарикоподшипников $K_{\min} = 0,005 \text{ мм}^2/\text{кгс}$, $K_{\max} = 0,025 \text{ мм}^2/\text{кгс}$.

Среднее квадратическое отклонение радиального зазора подшипника определяется по формуле [1,2]

$$\sigma(g_p) = \sqrt{D(g_p)},$$

где $D(g_p)$ - дисперсия рабочего зазора подшипника, равная

$$D(g_p) = D(g_n) + D(\Delta g_{II}) + D(\Delta g_t) + D(\delta_r), \quad (14)$$

$D(g_n), D(\Delta g_t), D(\Delta g_{II}), D(\delta_r)$ - соответственно дисперсии: начального зазора, изменения величины зазора от посадочного натяга, от перепада температур между кольцами и радиальной деформации под ее нагрузкой, метод определения значений которых приведен в [1,2]

2. Вероятность безотказной работы подшипникового узла, обусловленная перекосами подшипника, определяется по формуле [1,2]

$$P(\varphi \leq \varphi_{\max}) = 0,5 + \Phi \left(\overline{\varphi}_{\Sigma} / \sigma_{\varphi_{\Sigma}} \right), \quad (15)$$

где $\overline{\varphi}_{\Sigma}$ - математическое ожидание отклонения суммарного угла перекоса:

$$\bar{\varphi}_{\Sigma} = \sum_{j=1}^{N_n} \varphi_j, \quad (16) \quad N_n -$$

число причин отклонений взаимного расположения поверхностей; φ_j - взаимное расположение j -го отклонения поверхностей подшипника, равное

$$\varphi_j = \arctg \delta_j / R_j. \quad (17)$$

Здесь R_j - расстояние между соответствующими контактирующими поверхностями; δ_j - отклонение размеров посадочных поверхностей подшипника.

Среднее квадратическое отклонение суммарного угла перекоса $\sigma_{\varphi_{\Sigma}}$ определяется по формуле [1,2]

$$\sigma_{\varphi_{\Sigma}} = \sigma_{\varphi_{\Sigma_{нар}}} + \sigma_{\varphi_{\Sigma_{вн}}}, \quad (18)$$

где $\sigma_{\varphi_{\Sigma_{нар}}}$ и $\sigma_{\varphi_{\Sigma_{вн}}}$ - соответственно средние квадратические отклонения наружного и внутреннего колец подшипника, равные

$$\sigma_{\varphi_{\Sigma_{нар}}} = \sqrt{\sum \sigma_{\varphi_{жнарк}}^2 + \sum \sigma_{\varphi_{жкорп}}^2}, \quad \sigma_{\varphi_{\Sigma_{вн}}} = \sqrt{\sum \sigma_{\varphi_{жннк}}^2 + \sum \sigma_{\varphi_{жвала}}^2}. \quad (19)$$

Метод определения этих величин для конкретных типов подшипников приведен в [1,2].

3. Вероятность безотказной работы подшипника, обусловленная усталостным разрушением подшипника, определена по закону распределения Вейбулла [1,2]:

$$P_{ув}(t) = \exp \left[- \left(\frac{t}{6,84L} \right)^{1,17} \right], \quad (20)$$

где L - номинальная долговечность подшипников, определяемая по расчетной приведенной нагрузке Q и каталожной динамической грузоподъемности C по формуле [1,3]

$$L = \frac{10^6}{60n} \left(\frac{C}{Q} \right)^{\alpha}. \quad (21)$$

Для шариковых подшипников $\alpha=3$; для роликовых подшипников $\alpha=3,33$.

Приведенная нагрузка для шарикоподшипников и роликоподшипников вычисляется по формуле [1, 3]

$$Q = (x \cdot K_k \cdot R + Ay) \cdot K_{\delta} K_T, \quad (22)$$

где R, A - радиальная и осевая нагрузки, кг; x, y - коэффициенты радиальной и осевой нагрузок; K_{δ}, K_T, K_k - коэффициенты безопасности, температурный и вращения, значения которых приведены в [1, 2].

В результате многолетних наблюдений в [1, 2] приведены средние значения параметров для подшипников в зависимости от отношения $t_{ср} / L$. Для большинства

типов подшипников соотношение $t_{cp}/L=4,08, 5,0$ [1] и соответственно $R = 1,34$ или $1,17$; $T=5,35$ и $6,84$.

При этих значениях параметров уравнение (20) принимает вид

$$\begin{cases} P(t) = \exp\left[-\left(\frac{t}{5,35L}\right)^{1,34}\right] & \text{при } \frac{t_{cp}}{L} = 4,08, \\ P(t) = \exp\left[-\left(\frac{t}{6,84L}\right)^{1,17}\right] & \text{при } \frac{t_{cp}}{L} = 5,00. \end{cases} \quad (23)$$

4. Вероятность безотказной работы подшипникового узла, обусловленная потерями свойств смазки, определяется по формуле [1,2]

$$P_{cm}(t) = \exp(-t/T_{cp}), \quad (24)$$

где T_{cp} – среднее время безотказной работы подшипника, обусловленное потерями свойств смазки, определяемое по формуле [1,2]

$$T_{cp} = L_{cp}/60 \cdot n_o, \quad (25)$$

L_{cp} – среднее число циклов подшипника до отказа в связи с потерями свойств смазки, определяемое по формуле [1,2]

$$\lg L_{cp} = K + M/T, \quad (26)$$

где K, M – соответственно коэффициенты, учитывающие скоростной фактор и химический состав и структуру смазки.

Значения K и M для различных марок смазки, применяемых в генераторах, приведены в [1].

На основании предложенной методики проведен расчет надежности подшипниковых узлов синхронного генератора типа С-130 со следующими техническими характеристиками: мощность – 130 кВт , напряжение линейное – 230 В , скорость вращения – 8000 об/мин , частота – 400 Гц , трехфазный, КПД – $0,86$.

В таблице приведены результаты расчета надежности подшипниковых узлов за время 1000 и 2000 ч.

Как видно из таблицы, статистические данные надежности подшипников генераторов приведены за время 2000 ч. Анализ статистических данных об отказах этих генераторов показал хорошее их совпадение с результатами расчетов, проведенных по данной методике.

Таблица

Надежность (вероятность безотказной работы) подшипникового узла	Тип машин	Время эксплуатации машин, ч		Надежность подшипникового узла по статистическим данным
<i>Для генераторов</i>		1000	2000	
$P_{ув}(t)$	С-130	0,999	0,998	
$P_{см}(t)$		0,998	0,997	
$P(g_{min} \leq g \leq g_{max})$		0,997	0,994	
$P(\varphi \leq \varphi_{max})$		0,996	0,994	
$P_{под}(t)$		0,994	0,991	0,988

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Отраслевой стандарт ОСТ 16 0.800.887-81. Генераторы синхронные с высотой оси вращения от 56 до 355 мм (мощностью от 0,5 до 100 кВт). Надежность. Общие требования к надежности и методам контроля.
2. **Шекян Г.Г., Беллуян С.З.** Основные принципы расчета надежности подшипниковых узлов электрических машин мощностью до 1000 кВт // Матер. Респ. конф. мол. уч. НАН Армении. – Ереван, ГИУА, 1999. – С.93-97.
3. **Бейзелман Р.Я., Цыпкин В.В.** Подшипники качения: Справочник. – М.: Наука, 1960. – 642 с.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 25.10.2002.

Ջ.Ա. ԲԵԼԼՈՒՅԱՆ

ՄԻՆԵՐՈՆ ԳԵՆԵՐԱՏՈՐՆԵՐԻ ԱՌԱՆՔԱԿԱԼԱՅԻՆ ՀԱՆԳՈՒՅՑԻ ՀՈՒՍԱԼԻՈՒԹՅԱՆ ՀԱՇՎԱՐԿԻ ՄԵԹՈԴԻԿԱՆ

Բերված է սինխրոն գեներատորների հուսալիության հաշվարկի մեթոդիկա, որը հաշվի է առնում վերջիններիս կոնստրուկտիվ, արտադրական և շահագործման առանձնահատկությունները. առանցքակալի հոգնածության քայքայումը, քսուքի հատկությունների փոփոխությունները, բացվածքի մեծության և թեքման անկյան փոփոխությունները:

Z.A. BELLUYAN

DESIGN PROCEDURE OF BEARING UNIT RELIABILITY IN SYNCHRONOUS GENERATORS

Design methods of synchronous generator bearing unit reliability are given. Their development, technological and bearing fatigue failure, lubricant property losses, clearance size deviation and slope transfer are viewed. A comparison of design and maintenance data is given.

Ս.Գ.ԱՂԲԱԼՅԱՆ, Ֆ.Հ.ԶԱՔԱՐՅԱՆ, Ա.Մ.ՀՈՎՀԱՆՆԻՍՅԱՆ

**ՖԵՐՈՄՈԼԻԲԴԵՆԻ ՍՏԱՑՄԱՆ ՏԵԽՆՈԼՈԳԻԱԿԱՆ
ԱՌԱՆՁՆԱՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԸ ԵՎ ՔԱԶԱՐԱՆԻ ՀԱՐՍՏԱՑՈՒՑԻՉ
ՖԱԲՐԻԿԱՅԻ ՄՈԼԻԲԴԵՆԻՏԱՑԻՆ ԽՏԱՆՑՈՒԹԵՐԻՑ ՈՒ
ԹԱՓՈՆՆԵՐԻՑ ՆՐԱ ՍՏԱՑՄԱՆ ՏԵԽՆՈԼՈԳԻԱՅԻ ՄՇԱԿՈՒՄԸ**

Ուսումնասիրվել են ֆերոմոլիբդենի ստացման տեխնոլոգիական առանձնահատկությունները՝ ջերմաստիճանային տիրույթները, տեղի ունեցող փոխակերպությունները և ֆազային կազմը: Գոյություն ունեցող տեխնոլոգիական գործընթացների վերլուծության և համալիր հետազոտությունների հիման վրա մշակվել է այլումինաջերմային եղանակով ֆերոմոլիբդենի ստացման նոր տեխնոլոգիա, որտեղ որպես էլանյութեր օգտագործվել են Քաջարանի հարստացուցիչ ֆաբրիկայի մոլիբդենիտային խտանյութերից և թափոններից ստացված մոլիբդենի եռօքսիդն ու երկաթափոշին:

Առանցքային բառեր. ֆերոմոլիբդեն, խտանյութ, թերայրուք, օքսիդ, վերականգնում, համաձուլվածք, ֆազ, փոխակերպություն, դիագրամ:

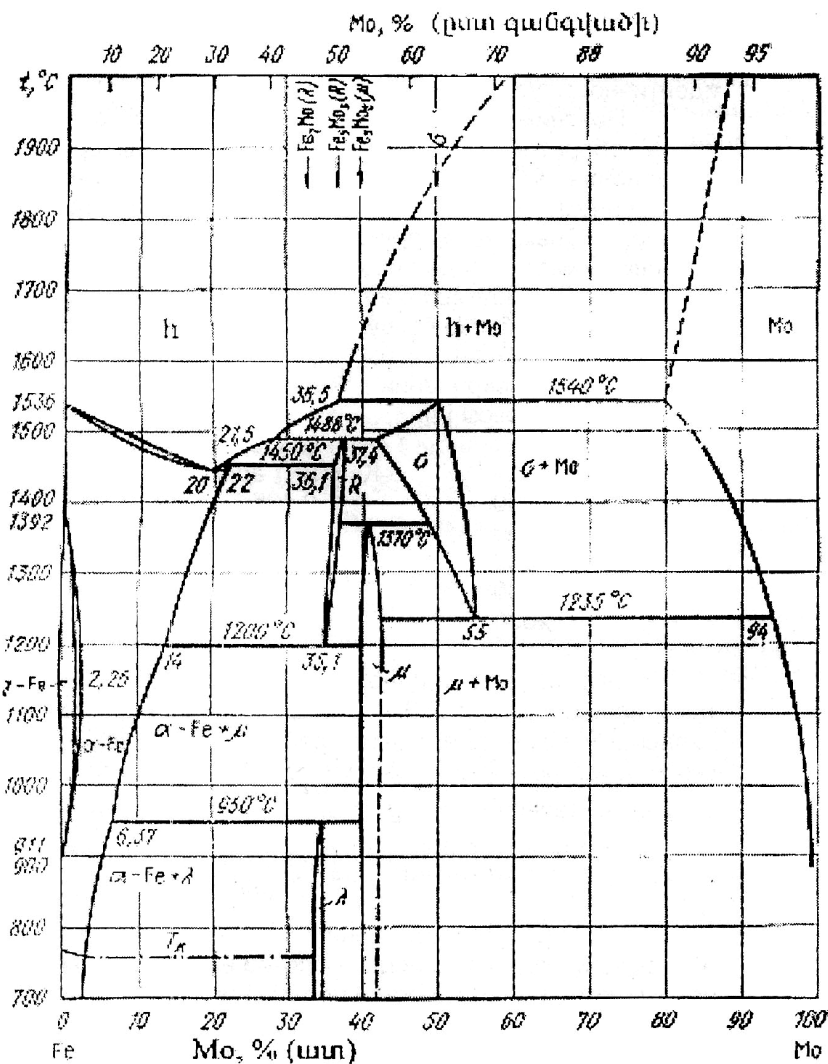
Մետաղների և համաձուլվածքների հատկությունները բնութագրվում են նրանց կառուցվածքով, որն իր հերթին կախված է քիմիական բաղադրությունից, ստացման տեխնոլոգիայից և հետագա ջերմային, մեխանիկական, ֆիզիկա-քիմիական և այլ եղանակներով մշակումներից: Այս տեսակետից պողպատների լեգիրումը մոլիբդենով, որը մեծ տարածում է գտել ժամանակակից մետալուրգիայում, խիստ արդիական է և հրատապ: Այն կարևորվում է հատկապես Հայաստանի Հանրապետության համար, որտեղ առկա են մոլիբդենի մեծ պաշարներ (~3%):

Մոլիբդենով պողպատների լեգիրման համար հիմնականում օգտագործվում է 55...65 % մոլիբդենի պարունակությամբ ֆերոմոլիբդեն: Դա բացատրվում է նրանով, որ մոլիբդենն ունի շատ բարձր հալման ջերմաստիճան (2617 °C) և, մյուս կողմից, մաքուր մոլիբդենով լեգիրման դեպքում այն շատ արագ օքսիդանում է՝ առաջացնելով MoO₃ օքսիդ, որը 600 °C -ից բարձր ջերմաստիճաններում ինտենսիվ կերպով սկսում է ցնդել, իսկ 795 °C - ում՝ հալվել [1]: Արդյունքում տեղի է ունենում մոլիբդենի մեծ կորուստ, որը տնտեսապես շահավետ չէ:

Այս տեսակետից ներկայացվող աշխատանքը, որի նպատակն է ուսումնասիրել ֆերոմոլիբդենի ստացման տեխնոլոգիական առանձնահատկությունները և դրա հիման վրա մշակել Քաջարանի հարստացուցիչ ֆաբրիկայի մոլիբդենիտային խտանյութերից ու թափոններից ֆերոմոլիբդենի ստացման տեխնոլոգիա, խիստ արդիական է և հրատապ:

Ինչպես երևում է Fe – Mo համաձուլվածքների վիճակի դիագրամից (նկ.1) [2], ըստ զանգվածի 55% Mo պարունակող համաձուլվածքը տաքացնելիս հեղուկ ֆազի առաջացումն սկսվում է 1488 °C - ում, որի համաձայն, սառեցման ժամանակ պերիտեկտիկական փոխակերպության շնորհիվ ստացվող R ֆազը (Fe₅Mo₃) տաքացնելիս փոխակերպվում է հեղուկ և σ ֆազերի (FeMo) մեխանիկական

խառնուրդի: Հետագա (մինչև 1540 °C ջերմաստիճան) տաքացման ժամանակ մեծանում է հեղուկ ֆազի և փոքրանում՝ σ ֆազի քանակությունները: 1540 °C σ ֆազը, որն ըստ զանգվածի պարունակում է 63,2 % Mo և առաջանում է սառեցման ժամանակ պերիտեկտիկական փոխակերպության շնորհիվ, փոխակերպվում է հեղուկ ֆազի և մոլիբդենի մեխանիկական խառնուրդի: Իսկ եթե Mo-ի պարունակությունն ըստ զանգվածի մեծ է 63,2 % -ից և փոքր 87,3 %-ից, մինչև 1540 °C ջերմաստիճան տաքացնելիս համաձուլվածքը գտնվում է պինդ վիճակում և նրա ստրուկտուրան բաղկացած է ((FeMo) ֆազի և Mo-ի դիսպերս մեխանիկական խառնուրդից: 55 % Mo պարունակող համաձուլվածքը դառնում է միաֆազ (հեղուկ ֆազ) ~ 1700 °C ջերմաստիճանում, իսկ 65 % պարունակողը՝ ~ 1900 °C – ում:



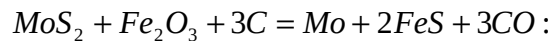
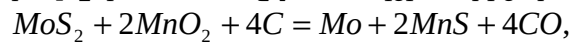
Նկ. 1. Fe-Mo համաձուլվածքների վիճակի դիագրամը

Մյուս կողմից, ըստ զանգվածի մոլիբդենի 50 % -ից ցածր պարունակության դեպքում համաձուլվածքի հալման ջերմաստիճանը կտրուկ իջնում է, իսկ 1450 °C –

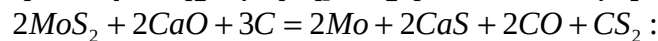
ում տեղի ունեցող պերիտեկտիկական փոխակերպության շնորհիվ առաջանում է α - Fe հիմքով մոլիբդենի պինդ լուծույթ, որը պարունակում է ըստ զանգվածի 32,6 % Mo: Հետագա սառեցման ժամանակ Mo-ի պարունակությունը α - Fe-ում փոքրանում է՝ կազմելով 1200 °C-ում՝ 21,8 %, 950 °C –ում՝ 10,5 %, իսկ սենյակային ջերմաստիճանում՝ 3,6%: 55...65 % Mo պարունակող համաձուլվածքի սառեցման ժամանակ պերիտեկտիկական (1370 °C) և էվտեկտոիդային (1235 °C) փոխակերպությունների շնորհիվ սենյակային ջերմաստիճանում համաձուլվածքի ստրուկտուրան բաղկացած է $\mu(\text{Fe}_3\text{Mo}_2)$ ֆազից և մաքուր մոլիբդենից, ընդ որում՝ μ ֆազի քանակությունը կազմում է. 55 % Mo-ի առկայության դեպքում՝ ~ 100 %, իսկ 65 % -ի դեպքում՝ 75,8 %:

Ֆերոմոլիբդենը ստանում են երկու տարբեր եղանակներով՝ չթծված և թրծված մոլիբդենային խտանյութերի՝ մոլիբդենիտի (MoS_2) վերամշակմամբ [3]:

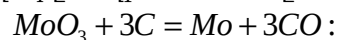
Չթրծված խտանյութերի վերամշակման ժամանակ տեղի են ունենում գործընթացներ, որոնք ընթանում են նշված ռեակցիաներից որևէ մեկով.



Սակայն ժամանակակից արտադրությունում այս եղանակները մեծ կիրառություն չեն գտել: Կիրառվում է նաև կրաքարի առկայությամբ մոլիբդենիտի՝ ածխածնով մշակման եղանակը: Այս դեպքում ընթանում է հետևյալ ռեակցիան.



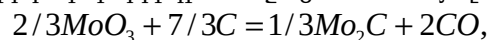
Գործնականում մեծ կիրառություն է գտել թրծված խտանյութի վերականգնումը ածխածնով, որը տեղի է ունենում ըստ հետևյալ ռեակցիայի.



Այս գործընթացը կիրառվել է եվրոպական մի շարք երկրներում և փորձարկվել ԽՍՀՄ-ում [3]:

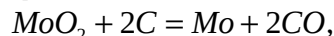
Մշակված տեխնոլոգիայի համաձայն՝ թրծված խտանյութին ավելացվում է ածխային փոշի, այն բրիկետացվում և բարձվում է միաֆազ էլեկտրական վառարան՝ միաժամանակ ավելացվում կրաքար և երկաթ: Հալումը կատարվում է մինչև բլոկի ստացումը՝ առանց մետաղի բաց թողնման: Մտացված համաձուլվածքը պարունակում է 35 - 50 % Mo, 1-2% Si և 6-8% C:

Տեսականորեն ռեակցիան սկսվում է 406 °C –ում: Ածխածնի առկայությամբ հնարավոր է նաև մոլիբդենի կարբիդի առաջացում՝ հետևյալ ռեակցիայով.



որն սկսվում է 402 °C -ում:

Մոլիբդենի երկօքսիդը ևս վերականգնվում է ածխածնով մինչև մետաղական վիճակ՝ հետևյալ ռեակցիայով.

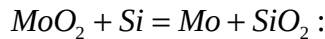
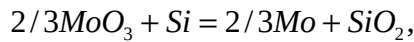


իսկ վերականգնումն սկսվում է 671 °C ջերմաստիճանից:

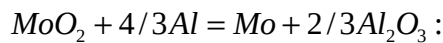
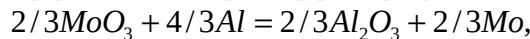
ԽՍՀՄ-ում, դեռևս 1929 թ., Ս.Ս.Շտեյնբերգի և Պ.Ս.Կուսակինի [4] կողմից փորձեր են կատարվել ֆերոմոլիբդենի ստացման ուղղությամբ, որոնց արդյունքում նրանց հաջողվել է ստանալ 50 – 65 % Mo, 4-6 % C և 0,06-0,77 % S պարունակող ֆերոմոլիբդեն, որից Mo-ի ելքը կազմել է 80-90%:

Վ.Պ.Ելյուտինի կողմից կատարված աշխատանքները ցույց են տալիս, որ հալման գործընթացում հնարավոր է ածխածնագրկում, իսկ ավելի ցածր ջերմաստիճանում ածխածնի պարունակությունը կարելի է իջեցնել մինչև 0,30-0,40 % C:

Ֆերոմոլիբդենի ստացման ավելի պարզ եղանակ է վերականգնման սիլիկաջերմային եղանակը, որն ընթանում է հետևյալ ռեակցիաներով.

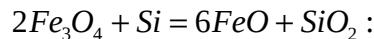


Գործընթացն ավելի ինտենսիվ է ընթանում ալյումինով վերականգնման ժամանակ, որը կատարվում է հետևյալ ռեակցիաներով.



Նշված ռեակցիաների ազատ էներգիաների փոփոխությունը՝ կախված ջերմաստիճանից (նկ.2), թույլ է տալիս եզրակացնել, որ այս եղանակներով հնարավոր է ստանալ բարձրորակ ֆերոմոլիբդեն:

Նշված տարրերով երկաթի օքսիդների վերականգնումն ընթանում է փուլերով՝ մի մասը վերականգնվում է մինչև մաքուր երկաթ, իսկ մյուս մասը՝ մինչև FeO, ընդ որում՝ FeO-ն անցնում է խարամ՝ նպաստելով նրա հեղուկահոսունության բարձրացմանը: Գործընթացն ընթանում է հետևյալ ռեակցիայով.



Ֆերոմոլիբդենի ստացման համար հումք է ծառայում մոլիբդենիտային խտանյութը, որն օքսիդացուցիչ թրծման է ենթարկվում բոցային, մուֆելային, պտտվող թմբուկային, բազմահատակային կամ եռացող շերտով վառարաններում: Արդյունքում ստացվում է թրծված խտանյութ (թերայրուք), որը բաղկացած է տարբեր խառնուրդներ պարունակող մոլիբդենի եռօքսիդից:

Մոլիբդենիտային խտանյութերը, ըստ մոլիբդենի և խառնուրդների պարունակության, պետք է բավարարեն աղյուսակ 1-ում բերված պահանջները:

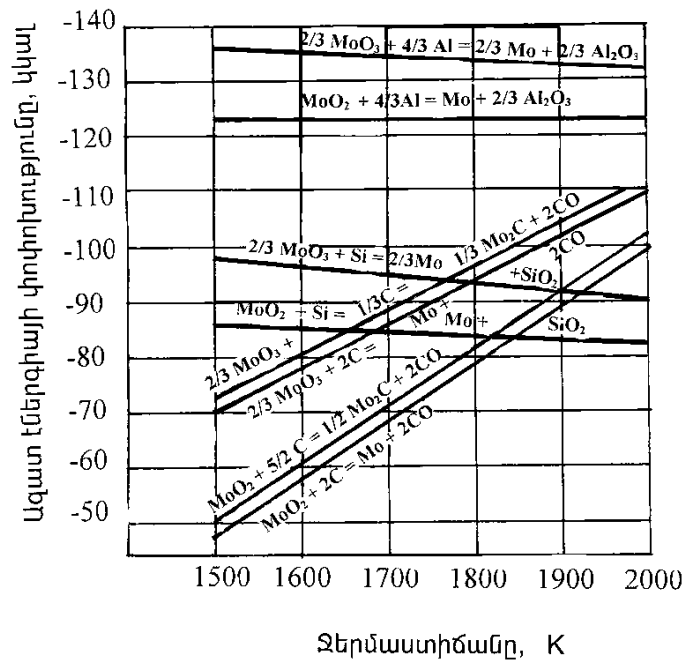
Աղյուսակ 1

Մոլիբդենիտային խտանյութի մակնիշը և քիմիական կազմը, %

Մակնիշը	Mo, ոչ պակաս, %	Քիմիական կազմը, %, ոչ ավելի				
		SiO ₂	As	Sn	P	Cu
KMՓ-B	52	4	0,03	0,02	0,02	0,4
KMՓ-1	51	5	0,04	0,02	0,02	0,4
KMՓ-2	48	7	0,05	0,04	0,03	0,7
KMՓ-3	47	9	0,06	0,05	0,05	1,0
KMՓ-4	45	11	0,07	0,07	0,05	2,0

Եթե թրծված խտանյութը (թերայրուքը) պետք է ուղարկվի ֆերոմոլիբդենի արտադրություն, ապա թրծման գործընթացն իրականացվում է այնպես, որ այրվի խտանյութում գտնվող ամբողջ ծծումբը:

Իսկ եթե այն պետք է ուղարկվի հետագա հիդրոմետալուրգիական մշակման, գործընթացը տարվում է այնպես, որ խտանյութում գտնվող ամբողջ մոլիբդենն անցնի լուծույթ:



Նկ.2. Ածխածնով, սիլիցիումով և ալյումինով մոլիբդենի օքսիդի վերականգնման ազատ էներգիայի փոփոխության կախվածությունը ջերմաստիճանից

Թերայուրքը, որը ստացվում է հարուստ մոլիբդենիտային խտանյութերի թրծմամբ, խտանյութերի պարունակությամբ պետք է բավարարի աղյուսակ 2-ում ներկայացվող պահանջները:

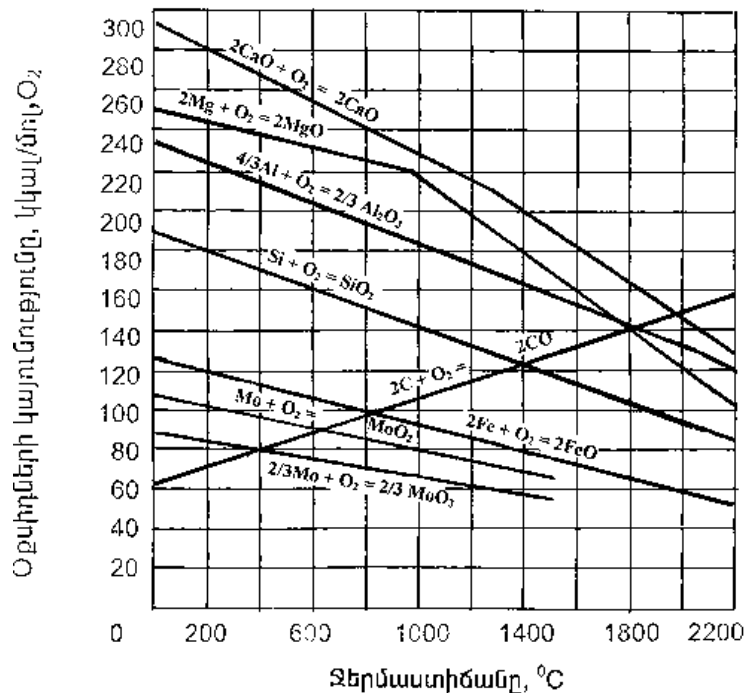
Աղյուսակ 2

Մոլիբդենի եռօքսիդին ներկայացվող տեխնիկական պահանջները, %

Մակնիշը	Mo, ոչ պակաս, %	Քիմիական կազմը, %, ոչ ավելի					
		As	Sn	P	Cu	C	S
KM0-1	55	0,05	0,03	0,03	0,6	0,2	0,15
KM0-2	53	0,06	0,05	0,05	1,0	0,5	0,18
KM0-3	50	0,07	0,07	0,07	1,5	1,0	0,20

Մոլիբդենի օքսիդներն ունեն ոչ մեծ կայունություն և հեշտությամբ վերականգնվում են ածխածնով, սիլիցիումով և ալյումինով, որի կինետիկական ցույց է տրված նկար 3-ում:

Սիլիկաջերմային եղանակով ֆերոմոլիբդենի ստացման բովախառնուրդային նյութեր են թրծված մոլիբդենիտային խտանյութը, հարուստ երկաթային հանքաքարը, երկաթի տաշեղները, կրաքարը և շպատը: Աղքատ խտանյութերի դեպքում օգտագործում են նաև սելիտրա:



Նկ.3.Ֆերոմոլիբդենի հալման ժամանակ հումքում գտնվող օքսիդների կայունության կախվածությունը ջերմաստիճանից

Գործընթացի տեսակարար ջերմունակությունը կազմում է 710 կալ/կգ (գործընթացն ըստ բովախառնուրդի գործնականորեն իրագործելի է 500 կալ/կգ ջերմության անջատման պայմաններում):

Գործընթացի ժամանակ որպես ֆյուսացնող նյութ օգտագործվում է նաև մանգանային հանքաքար, որը լավ հեղուկացնում է խարամը և նպաստում ծծմբի հեռացմանը: Որպես վերականգնիչ օգտագործվում է 75 % - անոց ֆերոսիլիցիում և մասամբ այլումին կամ սիլիկակալցիում:

Հալման համար նախապատրաստված նյութերը տրվում են չափաբաժանիչ կայան, որտեղից համապատասխան քանակով կշռվում են և տրվում խառնիչ թմբուկ: Խառնումից հետո բովախառնուրդը տրվում է հալման:

Ֆերոմոլիբդենը հալեցվում է հրակայուն նյութերով երեսպատված մետաղական գլանում: Որպես հրակայուն նյութ օգտագործվում է շամոտային աղյուս: Հալման տևողությունը 40-70 րոպե է: Հալման ավարտից հետո հալույթը պահվում է 20 րոպե, որի ժամանակ մետաղի կտորները նստում են հատակին: Այնուհետև հատուկ անցքով հեռացվում է խարամը, ստուգվում նրա մեջ մոլիբդենի պարունակությունը և, եթե այն չի գերազանցում 0,3 %-ը, ուղարկվում է թափոն:

Հավման գործընթացում վերականգնվում է մոլիբդենի օքսիդի 99 % -ից ավելին:

Հավման համար նախապատրաստվող բովախառնուրդն ունի հետևյալ բաղադրությունը, կգ

մոլիբդենային խտանյութ	100
75%- անոց ֆերոսիլիցիում	35,1
երկաթի հանքաքար	26,0
երկաթի տաշեղներ	19,5
ֆլյուորիտային շպատ	2,0
կրաքար	3,0
այլումին.....	3,7

Հավման գործընթացն իրականացվում է վերնից բռնկմամբ, ինչը նպաստում է մոլիբդենի կորստի փոքրացմանը: Բովախառնուրդի վերնի մասում բռնկման խառնուրդի համար բացվում են 2...3 անցքեր: Բռնկման խառնուրդն ունի հետևյալ բաղադրությունը.

այլումինային հատիկներ	15
սելիտրա	5
երկաթի հանքաքար	15
երկաթի տաշեղ	0,2

Այն այրում են շիկացրած երկաթի լարով:

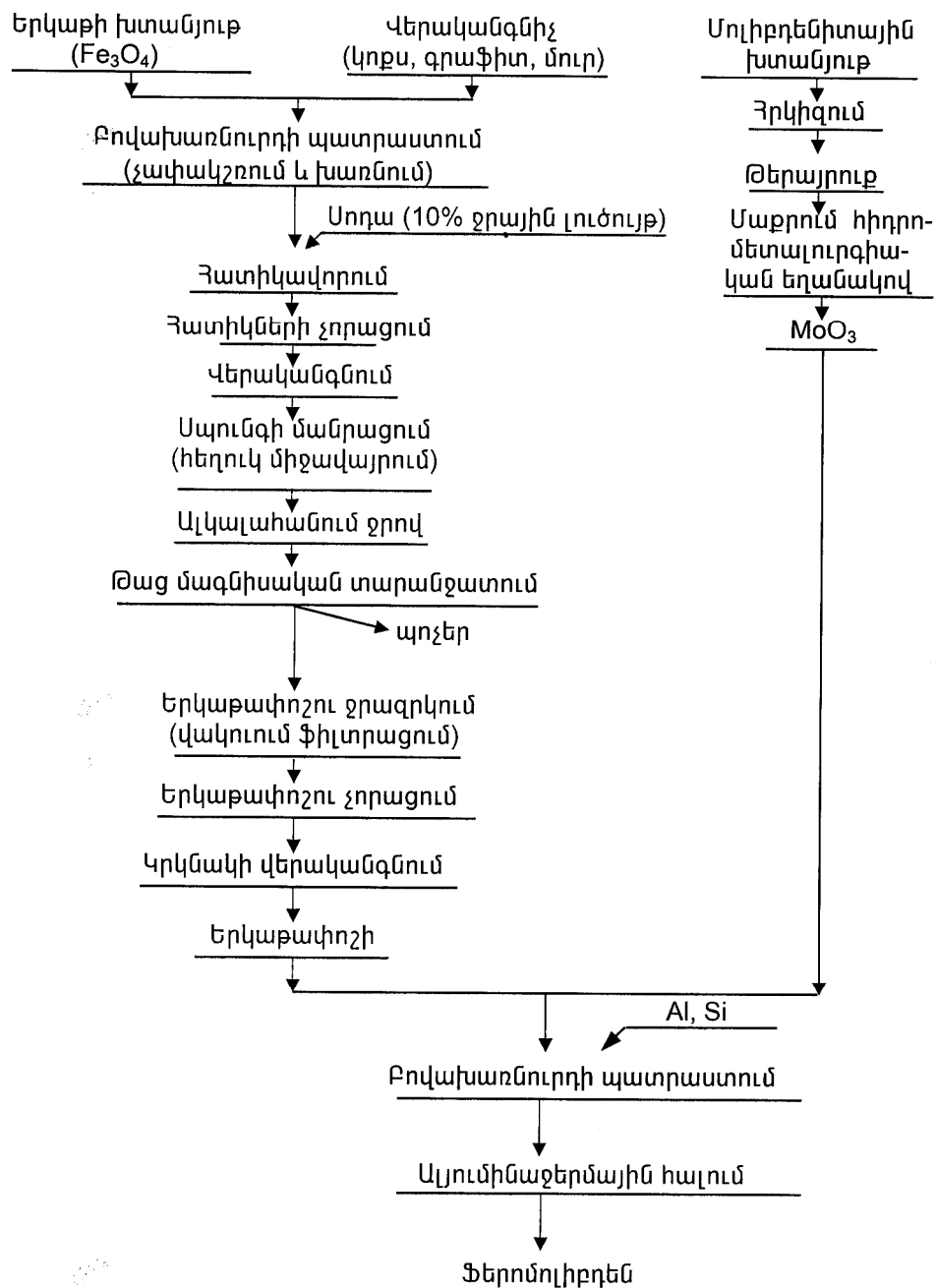
Մոլիբդենի կորզումը կազմում է 99,0-99,5 %: Հավման գործընթացում մոլիբդենի որոշ մասը հեռանում է գազերի հետ՝ մոլիբդենի եռօքսիդի տեսքով: Հետևաբար, անհրաժեշտ է ունենալ գազադրսման և գազամաքրման սարքավորումներ: Երբեմն մոլիբդենի բարձր պարունակությամբ խարամը մանրացվում և ենթարկվում է թաց հարստացման:

Ֆերոմոլիբդենի արտադրության գործընթացում օգտագործվող մոլիբդենային թերայրություն ծծմբի պարունակությունը չպետք է գերազանցի 0,1-0,2 % : Ստացված մոլիբդենային թերայրություն անհրաժեշտ է ունենալ գունավոր մետաղների և ոչ մետաղական խառնուրդների սահմանափակ քանակություն:

Հետևաբար՝ բարձրորակ ֆերոմոլիբդեն ստանալու կարևոր նախապայման են հանդիսանում ստացված թերայրություն ներկայացվող պահանջները: Այս նպատակի համար օքսիդացուցիչ թրծումից ստացված թերայրությամբ ենթարկվում են հիդրոմետալուրգիական մաքրման:

Կատարված վերլուծությունից պարզվում է, որ այլումինաջերմային եղանակով ֆերոմոլիբդենի ստացման գործընթացն ամբողջությամբ ուսումնասիրված չէ: Այս առումով խիստ կարևորվում է Քաջարանի հարստացուցիչ ֆաբրիկայում ստացված մոլիբդենիտային խտանյութից և ֆաբրիկայի թափոններից ստացված երկաթափոշուց [5] ֆերոմոլիբդենի ստացման գործընթացի փորձագիտական ուսումնասիրությունը և տեխնոլոգիայի մշակումը:

Կատարված համալիր հետազոտությունների հիման վրա մշակվել է ֆերոմոլիբդենի այլումինաջերմային եղանակով ստացման նոր տեխնոլոգիա, որտեղ որպես ելանյութեր օգտագործվել են Քաջարանի հարստացուցիչ ֆաբրիկայում ստացված մոլիբդենիտային խտանյութը և ֆաբրիկայի թափոններից ստացված երկաթափոշին (տեխնոլոգիական սխեման ներկայացված է նկ.4-ում):



Նկ. 4. Ալյումինաջերմային եղանակով ֆերոմոլիբդենի ստացման տեխնոլոգիական սխեմա

Ստացված ֆերոմոլիբդենը, ըստ ԳՈՍՏ 4759-79-ի, բավարարում է աղյուսակ 3-ում բերված տեխնիկական պահանջները:

Աղյուսակ 3

Ֆերոմոլիբդենի քիմիական բաղադրությունն ըստ ԳՈՍՏ 4759-79-ի								
		C	Si	S	P	Sb	Cu	Sn
ՓМ 1	60	0,05	0,8	0,1	0,05	0,01	0,5	0,01
ՓМ 2	58	0,08	1,0	0,12	0,05	0,02	0,8	0,02
ՓМ 3	55	0,08	1,0	0,12	0,08	0,02	0,8	0,02

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. **Самсонов Г.В.** Свойства элементов. Часть II . Химические свойства: Справочник. 2-е изд.- М.: Металлургия, 1976. – 384с.
2. Диаграммы состояния двойных и многокомпонентных систем на основе железа: Справочник / **О.А. Банных, П.Б.Будберг, С.П. Алисова** и др.- М.: Металлургия, 1986. – 440 с.
3. **Елютин В.П., Павлов Ю.А., Левин Б.Е., Алексеев Е.М.** Производство ферросплавов.- М.: Металлургиздат, 1957.- 436 с.
4. **Штейнберг С.С., Кусакин П.С.** Цветные металлы: Сборник научно-технических информации.- М.: ОНТИ, 1930.- № 11.
5. **Франгулян А.А.** Разработка технологии получения железных порошков из концентратов железорудных месторождений Армении: Автореф. дис... канд. техн. наук. - Ереван, 1998.- 18с.

ՀՊՀՀ: Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 07.10.2003.

С.Г. АГБАЛЯН, Ф.А. ЗАКАРЯН, А.М. ОГАНЕСЯН ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ ФЕРРОМОЛИБДЕНА И РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ЕГО ПОЛУЧЕНИЯ ИЗ РУД ЖЕЛЕЗО- МОЛИБДЕНОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ АРМЕНИИ

Исследованы технологические особенности получения ферромolibдена: температурные зоны, протекающие превращения и фазовый состав. На основе анализа известных технологических процессов и проведенных комплексных исследований разработана новая технология получения ферромolibдена методом алюминотермии, где в качестве исходных материалов использовали триокись молибдена и железный порошок, полученный из молибденитового концентрата и хвостов Каджаранской обогатительной фабрики.

S.G.AGHBALYAN, F.A.ZAKARYAN, A.M.HOVHANNISSYAN TECHNOLOGICAL PECULIARITIES OF OBTAINING FERROMOLYBDENUM AND ELABORATION OF TECHNOLOGY FOR EXTRACTING IT FROM THE ORES OF IRON-MOLYBDENUM DEPOSITS IN ARMENIA

The technological peculiarities of obtaining ferromolybdenum, i.e. temperature zones, the transformation flow, and the phase composition are investigated. On the basis of the known production method analysis and complex investigations, a new technology to obtain ferromolybdenum by the method of aluminothermy is elaborated in which molybdenum trioxide and iron powder have been used as source materials obtained from molybdenum concentrate and the tailings of Kajaran concentrating mill.

Ա.Կ. ՊՈՂՈՍՅԱՆ, Վ.Վ. ՍԱՐՈՅԱՆ, Տ.Ռ. ՄԱՐՏԻՐՈՍՅԱՆ

ԱՐՏԱԴՐԱԿԱՆ ԹԱՓՈՆՆԵՐԻ ՀԻՄՔՈՎ ՆՈՐ ՔՍՈՒՔՆԵՐԻ
ՇՓԱԳԻՏԱԿԱՆ ՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄ

Օլեինաթթվի արտադրական թափոնների հիման վրա պլաստիկ քսուքների ստեղծման հնարավորության ուսումնասիրության նպատակով մշակվել են մի շարք քսուքայուղային կոմպոզիտներ՝ թափոնի և եռթանոլամին հակակոռոզիոն հավելանյութի հիման վրա՝ հաշվի առնելով վերջինիս բարձր թանձրացնող ունակությունը: Համեմատության համար ուսումնասիրվել են նաև հայտնի Լիտոլ-24 քսուքի համանման բնութագրերը: Բացահայտվել են օլեինաթթվի արտադրական թափոն պարունակող քսուքայուղային կոմպոզիտների հակամաշվածքային, հակաքերծվածքային և հակաշփական ներգործության մեխանիզմները:

Առանցքային բառեր: շփագիտություն, արտադրական թափոն, հավելանյութ, քսուք:

Մեքենաների շփահանգույցների երկարակեցության բարձրացման արդյունավետ և, միաժամանակ, բնապահպանական միջոցներից է քսուքայուղային նյութերի որակի բարելավումն արտադրական թափոնների հիման վրա մշակված նոր քսուքայուղային նյութերի և հավելանյութերի օգտագործմամբ [1]: Լավագույն քսուքայուղային կոմպոզիտներ ընտրելիս պահանջվում է համալիր մոտեցում. ֆիզիկաքիմիական և, հատկապես, շփագիտական անհրաժեշտ բնութագրերի ապահովման հետ մեկտեղ խնդիրն անհրաժեշտ է դիտարկել նաև տնտեսական և բնապահպանական տեսակետներից: Այդ առումով մեծ հետաքրքրություն են ներկայացնում օլեինաթթվի արտադրական թափոնները (ՕԱԹ)՝ մակերևութաակտիվ նյութերին (ՄԱՆ) բնորոշ օլեինաթթվի բարձր (մինչև 80%) պարունակությամբ, ինչը հիմք հանդիսացավ ՕԱԹ-ի հատկությունների մանրամասն ուսումնասիրման, որպես ինքնուրույն քսուքայուղային նյութ, ինչպես մաքուր տեսքով, այնպես էլ այլ բաղադրամասերի հետ խառնուրդի ձևով [2, 3]: Այդ նպատակով ՕԱԹ-ի և եռթանոլամին (ԵԷԱ) հակակոռոզիոն հավելանյութի հիման վրա մշակվել են մի շարք քսուքայուղային կոմպոզիտներ՝ հաշվի առնելով վերջինիս բարձր թանձրացնող ունակությունը:

ՕԱԹ-ի հիման վրա մշակված քսուքայուղային կոմպոզիտների յուղման հատկությունների համեմատական գնահատման համար ուսումնասիրվել են նաև լայն տարածում գտած Ի-Գ-Ա-68 (ԳՈՍՏ 17479-87) մակնիշի արդյունաբերական յուղի հատկությունները: Ստացված կոմպոզիտների ֆիզիկաքիմիական հատկությունների համեմատական վերլուծությունը (աղ.1) ցույց է տալիս, որ, արդյունաբերական յուղի հետ համեմատած, դրանք ունեն կինեմատիկ մածուցիկության, թթվայնության և խտության ավելի բարձր արժեքներ: Երկու քսուքայուղերից ավելի կոռոզիակայուն է ՕԱԹ-ն. կոռոզիոն փորձարկման պայմաններում պողպատյա փորձանմուշներն ՕԱԹ-ի միջավայրում արտաքինից ծածկվում են բարակ շերտով և ծանրանում, իսկ արդյունաբերական յուղի միջավայրում՝ թեթևանում, և թիթեղի մակերևույթի որոշ հատվածներում առաջանում են կոռոզիայի հետքեր՝ բծերի և կետերի տեսքով:

Օլեինաթթվի մոլեկուլները, բնեռային կարբոնիլ COOH ակտիվ խմբերի շնորհիվ մետաղական մակերևույթի վրա, միջավայրի ջերմաստիճանի ազդեցության տակ տեղի ունեցող մակակլանման հետևանքով առաջացնում են բարձրակողմնորոշված կառուցվածքի սահմանային շերտեր: Այս պրոցեսն ընթանում է աստիճանաբար՝ մակակլանված մոլեկուլների կուտակման աճով, ընդհուպ մինչև մակակլանման շերտի հագեցում և ուղեկցվում է մոլեկուլների տեղաշարժով՝ վերջիններիս մակերևութային շարժունության պատճառով:

Մակակլանման շերտի հավասարակշռությունը որոշվում է ադսորբցիայի և դեսորբցիայի արագությունների հավասարության պայմանով: Այս կերպ առաջացած սահմանային շերտերն արգելք են հանդիսանում թթվածնի՝ պողպատի մակերևույթ ներթափանցման և կոռոզիոն պրոցեսի առաջացման համար: Ուստի քսուքայուղի հակակոռոզիոն ակտիվության մակարդակը որոշվում է սահմանային շերտի կառուցվածքով ու հատկություններով: Արդյունաբերական Ի-Գ-Ա-68 յուղի ցածր թթվային թիվը (աղ.1) ցույց է տալիս, որ օքսիդացնող բաղադրիչները նորմալ պայմաններում գործնականում բացակայում են: Դրանք հայտնվում են կոռոզիոն փորձարկման ժամանակ, ջերմաօքսիդացման պրոցեսների հաշվին: Այդ բաղադրիչների փոխազդեցությունը պողպատի հետ բերում է վերջինիս մակերևութին օքսիդային թաղանթների առաջացմանը, որոնց հետագա աճը կախված է թթվածնի թափանցման հնարավորությունից:

Աղյուսակ 1

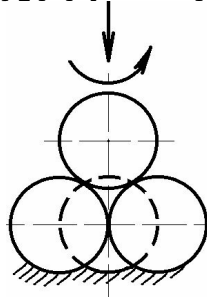
ՕԱԹ-ի և ԵԷԱ հավելանյութի հիմքով քսուքայուղային կոմպոզիտների ֆիզիկաքիմիական բնութագիրը

Քսուքայուղային նյութ	Կինեմատիկ մածուցիկություն 100°C-ում, մմ ² /վրկ	Թթվային թիվ, KOH/գր	Խտություն 20°C-ում, կգ/մ ³	Պողպատյա փորձանմուշների քաշի փոփոխությունը կոռոզիայի հետևանքով, գր
ՕԱԹ	29,9	35,0	890	+ 0,4119
ՕԱԹ + 0,5% ԵԷԱ	35,0	32,5	892	+ 0,5012
ՕԱԹ + 1% ԵԷԱ	46,0	30,6	899	+ 0,5935
ՕԱԹ + 2% ԵԷԱ	64,8	29,2	905	+ 0,6672
ՕԱԹ + 4% ԵԷԱ	81,5	26,4	918	+ 0,7831
ՕԱԹ + 5% ԵԷԱ	92,0	25,1	924	+ 0,8162
Ի-Գ-Ա-68	12,5	0,05	670	- 0,0763

Օլեինաթթվի արտադրական թափոնների հիման վրա պլաստիկ յուղման նյութերի (քսուք) ստեղծման նպատակով որպես հավելանյութ օգտագործվել է հակամաշվածքային և հակակոռոզիոն եռթանոլամին (ԵԷԱ) հավելանյութը [4]: Աղյուսակ 1-ի տվյալներից հետևում է, որ քսուքայուղերի բաղադրակազմում ԵԷԱ-ի առկայությունը մեծացնում է կինեմատիկ մածուցիկությունը, խտությունը և փոքրացնում թթվայնությունը:

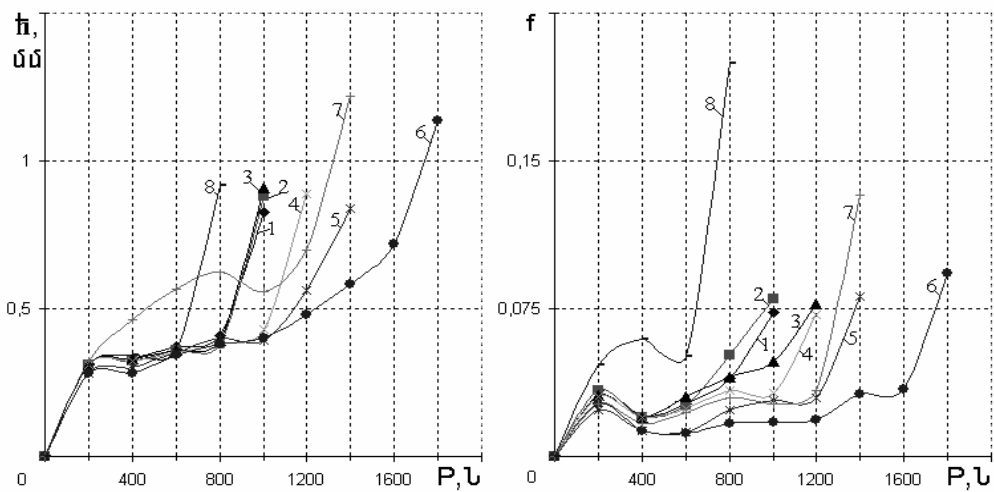
Քսուքայուղային կոմպոզիտների շփագիտական հատկություններն ուսումնասիրվել են MAST տիպի չորսգնդային մեքենայի վրա՝ ԳՈՍՏ-9490-88-ին համապատասխան (նկ.1): Փորձերը կատարվել են 12,7 մմ տրամագծով ՇՆ-15 մակնիշի երկաթյա գնդերի օգտագործմամբ, սենյակային ջերմաստիճանի

պայմաններում և 0,31 մ/վրկ սահքի արագությամբ: Արդյունքում գրանցվել են շփագնդերի մաշման հետքի h միջին տրամագծի (մաշվածքի չափի), կերամաշման P_4 բեռնվածքի և շփման f գործակցի արժեքները: Փորձարկումների համեմատական արդյունքները բերված են նկար 2-ում և աղ.2-ում:



Նկ.1.Չորսգնդային մեքենայի շփման հանգույցի սխեման

Արդյունքներից հետևում է, որ նոր քսուքայտուղային կոմպոզիտները հակաշփական և հակամաշվածքային հատկություններով գերազանցում են Ի-Գ-Ա-68 մակնիշի արդյունաբերական յուղին (կերամաշման բեռնվածությունը բարձր է 1,25 անգամ, իսկ շփման գործակիցը ցածր է 1,8 անգամ): Շփման ժամանակ, անկախ պաշտպանիչ թաղանթների կազմավորման բնույթից, ՕԱԹ-ի և Ի-Գ-Ա-68 յուղի մաշման պրոցեսներն ընթանում են համանման մեխանիզմներով՝ ունենալով կոռոզիոնամեխանիկական բնույթ, ինչը շփվող մեքենամասերի մաշման առավել տարածված տեսակն է: Մաշման այս տեսակը ենթադրում է մետաղի մակերևույթին պաշտպանիչ թաղանթների կազմավորման և քայքայման անընդհատ պրոցես: Եթե պաշտպանիչ շերտերի կազմավորման արագությունը գերազանցում է դրանց քայքայման արագությանը, ապա շփումն ընթանում է չափավոր մաշման ռեժիմով:



Նկ.2. Մաշվածքի չափի և շփման գործակցի կախումներն առանցքային բեռնվածքից

1 - ՕԱԹ, 2 - ՕԱԹ+0,5 կշն.% ԵԷԱ, 3 - ՕԱԹ+1 կշն.% ԵԷԱ, 4 - ՕԱԹ+2 կշն.% ԵԷԱ,
5 - ՕԱԹ+4 կշն.% ԵԷԱ, 6 - ՕԱԹ+5 կշն.% ԵԷԱ, 7 - Լիտոլ-24, 8 - Ի-Գ-Ա-68

Քսուքայուղային նմուշների հարակցման ցուցանիշները

Նմուշի անվանում	Կառուցվածքային բանաձև	Հարակցման ցուցանիշ, Ս _ը , Ն
Լիտոլ-24	$C_{17}H_{35}COOH$ Ստեարինաթթու	1000
ՕԱԹ+ԵԷԱ 5 կշն %.	$C_{17}H_{33}COOH$ Օլեինաթթու	1304
ՕԱԹ+ԵԷԱ 4 կշն %.	- " -	480
ՕԱԹ+ԵԷԱ 2 կշն %.	- " -	438
ՕԱԹ+ԵԷԱ 1 կշն %.	- " -	410
ՕԱԹ+ԵԷԱ 0,5 կշն %.	- " -	400
ՕԱԹ	- " -	986
Ի-Գ-Ա-68	-	384

Հակառակ դեպքում՝ մարմինների անմիջական հպման տեղերում առաջանում է թաղանթային քաղցի վիճակ, ինչը հագեցնում է մեքենամասերի հարակցմանն ու կերամաշմանը:

Քսուքայուղային ՕԱԹ + ԵԷԱ կոմպոզիտներից երեքը (բաղադրամասերի հետևյալ հարաբերակցություններով՝ 2, 4 և 5 կշն. % ԵԷԱ) իրենց շփագիտական (քսուքայուղային) հատկություններով չեն զիջում ՕԱԹ-ին (նկ. 2): Լավագույն հատկություններով օժտված են ՕԱԹ(ԵԷԱ-ի 5 կշն.% քսուքայուղային կոմպոզիտները, որոնց կերամաշման բեռնվածքը՝ համեմատած ՕԱԹ-ի հետ, բարձր է 1,8 անգամ, իսկ շփման գործակիցը փոքր է 1,3 անգամ: Նշված ՕԱԹ+ԵԷԱ 5 կշն.% կոմպոզիտը բարձր բեռնունակությամբ պլաստիկ յուղման նյութ (քսուք է, որի շփագիտական բնութագրերը համեմատելի են համանման հատկություններով օժտված և ԱՊՀ երկրներում լայնորեն կիրառվող Լիտոլ-24 (ԳՈՍՏ-21150-87) լիթիումային քսուքի հետ: Ավելին, ստացված նմուշը ոչ միայն շփագիտական բնութագրերով է գերազանցում Լիտոլ-24 քսուքին (կերամաշման բեռնվածությունը բարձր է 1,3 անգամ, շփման գործակիցը ցածր է 1,3 անգամ), այլ նաև ինքնարժեքով: Օլեինաթթվի արտադրական թափոնի հիման վրա ստացված քսուքի հակամաշվածքային, հակաքերծվածքային և հակաշփական ներգործության մեխանիզմների հիմքում ընկած են պողպատի մակերևույթի հետ մակերևութաակտիվ նյութերի փոխազդեցության հիմնական սկզբունքը՝ քսուքայուղի ակտիվ խմբերի մակակլանման և քիմակակլանման, որոնց արդյունքում ձևավորված սահմանային շերտերը նպաստում են քսուքայուղային նյութի շփագիտական բնութագրերի բարձրացմանը:

Այսպիսով, օլեինաթթվի արտադրական թափոնների հիման վրա մշակված քսուքայուղային կոմպոզիտները կարելի է կիրառել սահմանային յուղման պայմաններում շահագործվող ծանրաբեռնավորված շփահանգույցներում (սափի առանցքակալներ, ատամնավոր, որդնյակային և շփական փոխանցումներ, բռունցքային մեխանիզմներ): ՕԱԹ+ԵԷԱ 5 կշն.% քսուքայուղային կոմպոզիտն առաջարկվում է կիրառել նաև ավտոմեքենաների շփահանգույցներում՝ որպես բազմաֆունկցիոնալ պլաստիկ յուղման նյութ:

Հետազոտությունը կատարված է Քաղաքացիական Հետազոտությունների և Չարգացման Հիմնադրամի (CRDF) աջակցությամբ:

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. **Балтенас Р., Сафонов А.С., Ушаков А.И., Шергалис В.** Трансмиссионные масла, пластичные смазки. Состав. Свойства. Классификация. Применение. -СПб.: ООО "Издательство ДНК", 2001. - 208 с.
2. **Погосян А.К., Арустамян Ю.С., Геворкян Г.Р.** Новые галогенсодержащие соединения в качестве присадок // Трение и износ. – 1993. -(4 (14)). – С. 725-729.
3. **Трофимов В.А., Спиркин В.Г., Шкода М.В., Кожекина Е.А., Бочаров А.А.** Серо- и азотсодержащие производные олеиновой кислоты как противоизносные присадки к нефтяным маслам // Химия и технология топлив и масел. – 1996. -(3. -С. 40-41.
4. **Богданова Т.И., Шехтер Ю.Н.** Ингибированные нефтяные составы для защиты от коррозии. –М.: Химия, 1984. – 316.

ՀՊՃՀ: Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 13.06.2003:

А.К. ПОГОСЯН, В.В. САРОЯН, Т.Р. МАРТИРОСЯН

ИЗУЧЕНИЕ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НОВЫХ КОНСИСТЕНТНЫХ СМАЗОК НА ОСНОВЕ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОТХОДОВ

С целью изучения возможности создания консистентных смазок на основе промышленных отходов олеиновой кислоты получен ряд смазочных композитов из отходов и антикоррозионной присадки триэтаноламин, учитывая загущающее свойство последнего. Для сравнения исследованы схожие свойства смазки Литол-24. Выявлен механизм противоизносного, противозадирного и антифрикционного воздействия композиционных смазок на основе промышленного отхода.

A.K. POGOSIAN, W.V. SAROYAN, T.R. MARTIROSYAN

STUDY OF TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF NOVEL GREASES BASED ON INDUSTRIAL WASTES

The main objective of this study is to develop a new class of lubricating composite materials, using the local industrial wastes. For that purpose a number of lubricant composites based on the industrial wastes of oleic acid and an anticorrosion additive triethanolamine have been processed, considering the fine thickening capability of the latter. The similar properties of lithium grease Litol-24 have been studied for comparison as well. The conception of antiwear, antiscoring and antifriction influence mechanism of composite greases based on industrial wastes are detected.

С.Г. МАМЯН, А.В. АНДРИАСЯН

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОДОРОДНОГО ОХРУПЧИВАНИЯ ПРИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ (ВТМО) ПОРОШКОВЫХ СТАЛЕЙ

Установлено, что при прямой ВТМО порошковых сталей общее количество водорода, находящегося в виде твердого раствора и в молярном состоянии, аккумулированного в порах, может достигнуть 10...20 $\text{см}^3/100 \text{ г}$ металла. Это приводит к флокенообразованию и ухудшению механических свойств, особенно при жестких методах испытаний.

Ключевые слова: водородное охрупчивание, термомеханическая обработка, флокенообразование, интеркристаллитная хрупкость, обезводораживание.

При получении высокопрочных ($\sigma_{\text{в}}=1500\ldots2400 \text{ МПа}$) конструкционных деталей и инструментов из порошковых стальных заготовок путем спекания в водородной среде и последующей горячей пластической деформации (ковка, штамповка, экструзия, динамическое горячее прессование) часто встречаются явления водородного охрупчивания [1-4], в связи с чем исследование особенностей водородного охрупчивания при ВТМО порошковых сталей имеет важное научно-практическое значение.

Водород в сталях находится в твердом растворе или скапливается в порах – на границах зерен и на дислокациях. Хрупкость стали проявляется тем резче, чем выше ее прочность. Сильное охрупчивание наблюдается в закаленных сталях с мартенситной структурой [5].

Растворимость водорода в техническом железе зависит от состава сплава, температуры и давления водорода (рис. 1). При 910°C растворимость водорода в $\gamma\text{-Fe}$ составляет 6,5 $\text{см}^3/100 \text{ г}$, а при температуре спекания 1150°C – 8 $\text{см}^3/100 \text{ г}$. При обычных температурах, порядка комнатной, кажущаяся повышенная растворимость может быть обусловлена образованием соединений или выделением водорода в порах и на дефектах строения.

Из образцов сравнительно небольшого сечения, охлаждаемых медленно в печи или на воздухе, растворенный при высоких температурах водород удаляется почти полностью. В больших образцах, естественно, остается много водорода. О влиянии различных легирующих элементов на растворимость водорода имеется мало данных. Никель, марганец и кобальт повышают растворимость, а углерод, хром, алюминий и, по - видимому, кремний снижают ее.

Из всех известных элементов водород диффундирует в железо сравнительно быстро, т.к. атомный диаметр водорода наименьший. В [5] на основании вычислений даны следующие уравнения для коэффициента диффузии:

$$D_{\text{H}}(\alpha) = 2,2 \cdot 10^{-3} e^{-2900/RT} \text{ см}^2/\text{с}, \quad D_{\text{H}}(\gamma) = 1,1 \cdot 10^{-2} e^{-2900/RT} \text{ см}^2/\text{с}.$$

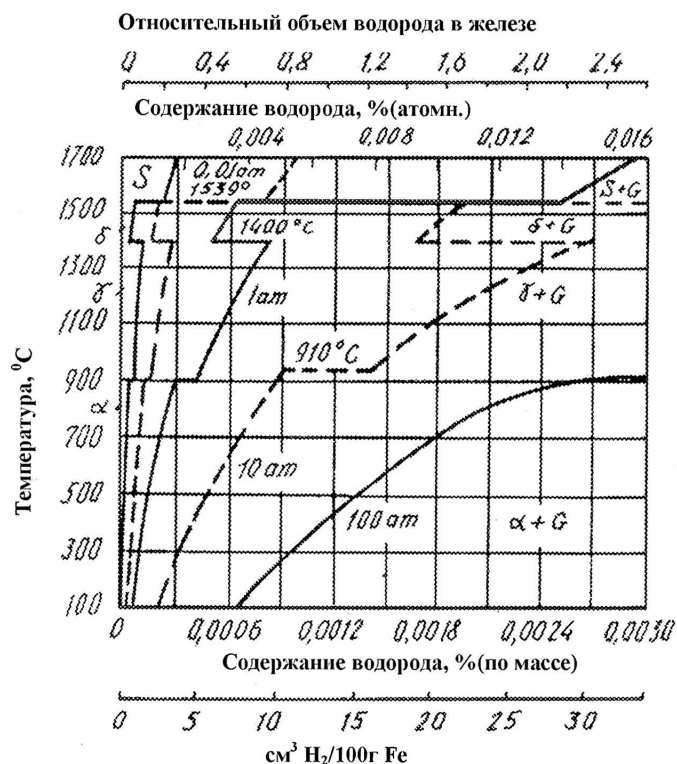


Рис. 1. Растворимость водорода в железе при различных давлениях

Следует различать диффузию и способность к проникновению (или выхода). Если для процесса диффузии определяющим является градиент концентрации внутри металла, то для способности к проникновению существенное значение имеют реакции на поверхности материала.

При обычных режимах спекания в водородосодержащих средах, кроме атомарного водорода, находящегося в твердом растворе, значительное его количество аккумулируется в порах. С точки зрения экономичности и технологичности, формирование деталей методом горячей деформации часто осуществляется непосредственно с температуры спекания (рис. 2). При этом происходит захлопывание пор, в которых имеется значительное количество водорода, что является причиной флокенообразования послековки, штамповки и экструзии, приводящего к резкому снижению пластичности и характерному интеркристаллитному излому.

С целью изучения проблемы водородного охрупчивания с исключением остальных факторов (чистоты и дисперсности порошков) и создания наилучших условий при рентгеноструктурных анализах тонкого строения мартенсита исследования проводились на сталях П25, П35, ПУ8А, П40Х, П40ХН, П40ХНМ, П12ХН3А, полученных на основе карбонильного железного порошка марок А2 и ЦНИИЧМ. С целью обеспечения гомогенности сталей шихта изготовлялась из

дисперсных порошков (<50 мкм) механическим высокоэнергетическим смешиванием в шаровых мельницах.

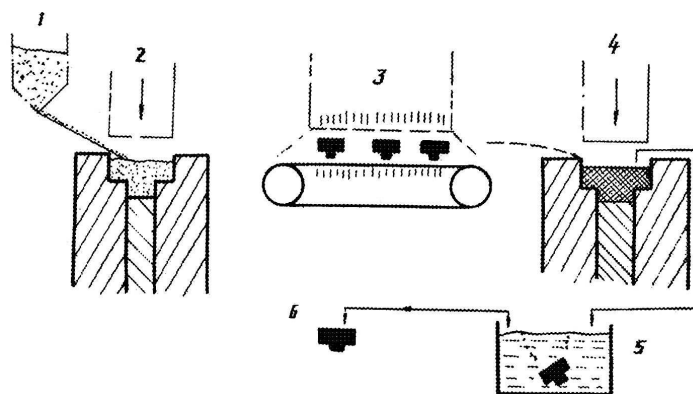


Рис.2. Схема получения высокопрочных порошковых деталей с применением ВТМО: 1-бункер с порошком, 2- прессование, 3 – нагрев заготовок в контролируемых атмосферах, 4 – горячая деформация (формирование деталей), 5- закалка, 6-отпуск

Спрессованные плоские и цилиндрические образцы пористостью 20...25% спекались в атмосфере водорода (точка росы – 27°C). Выбранные режимы обеспечивали получение гомогенных структур. Часть образцов пористостью 8...15% после спекания подсуживали до температуры 800...900°C и подвергали ВТМО экструзией с 6-кратным обжатием. Другую часть подвергали вакуумному отжигу при температуре 500...550°C (обезводораживание), после чего осуществляли ВТМО с аналогичными режимами. С целью выявления эффекта ТМО образцы после экструзии подвергали полному отжигу при 870°C в вакуумной печи с выдержкой 3 ч и дальнейшей закалке с отпуском – обычная термическая обработка (ОТО).

Для определения количества водорода и кислорода образцы подвергали газовому анализу методом вакуум – плавления.

Анализ результатов механических испытаний порошковых сталей показал, что при всех режимах термомеханического упрочнения по сравнению с ОТО наблюдается резкое повышение прочностных и одновременно пластических характеристик на 40...60%. Например, для стали ПУ8К, несмотря на промежуточный вакуумный обезводораживающий отжиг, механические свойства после ОТО получаются очень низкими: при 300°C – $\sigma_{\text{в}}=1300 \text{ МПа}$, $\delta = 1...2\%$.

Согласно нашим исследованиям, а также по данным [2], содержание водорода в компактной высокопрочной порошковой стали после ВТМО с экструзией или динамического горячего прессования (при осуществлении горячей деформации непосредственно с температуры спекания) составляет в среднем 12...20 см³/100 г металла в зависимости от исходной пористости заготовки, в то время как содержание водорода в кислой мартеновской стали колеблется в пределах от 3...4 до 5...7 см³/100 г металла.

Проблема водородного охрупчивания заметно выявляется при изготовлении порошковых массивных деталей с использованием более жестких схем деформации: экструзии,ковки и штамповки.

Анализ механических свойств после ВТМО цилиндрических ($\Phi 40$ мм) образцов (экструзия с 6-кратным обжатием) с исходной пористостью 15% показал, что обезводороживание перед ВТМО приводит к резкому повышению комплекса механических свойств (табл. 1). При осуществлении ВТМО непосредственно после спекания (содержание водорода $16 \text{ см}^3/100\text{г}$) из-за водородного охрупчивания наблюдалось флокенообразование (рис.3), приводящее к интеркристаллитному разрушению вплоть до высоких температур отпуска ($400\ldots 500^\circ\text{C}$).

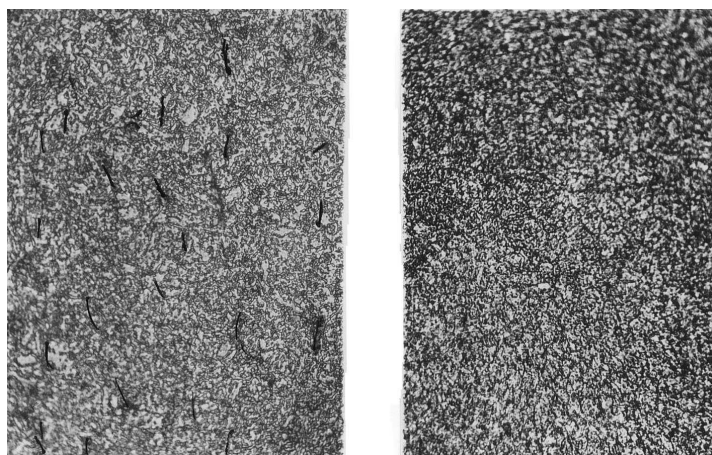


Рис. 3. Микроструктура порошковой стали ПУ8 после ВТМО:

- а - с температуры спекания (прессование + спекание при 1150°C + подстуживание до 900°C + закалка + отпуск при 200°C);
- б - включающей обезводороживающий отжиг (прессование + спекание + охлаждение до комнатной температуры + обезводороживающий отжиг при 550°C + ВТМО + отпуск при 200°C)

Как видно из табл. 1, после обезводороживания (содержание водорода не превышало $1,5 \text{ см}^3 / 100 \text{ г}$ металла) значительно повышаются как прочностные, так и пластические свойства, особенно ударная вязкость (КСУ) и работа распространения трещины (КСТ).

На примере У8К видно, что после ВТМО вне зависимости от содержания водорода отмечается значительное повышение механических свойств по отношению с ОТО. В данном случае резкое повышение комплекса механических свойств можно объяснить как процессом обезводороживания, так и формированием развитой дислокационной субструктуры мартенсита в результате ВТМО.

Таблица 1

Механические свойства порошковых сталей после ВТМО с экструзией

Марка порошковой стали	$t_{отп.},$ °C	$\sigma_B,$ МПа	$\sigma_{0.2},$ МПа	$\delta,$ %	$\psi,$ %	KCU, МДж/м ²	KCT, МДж/м ²
У8К	300	$\frac{2050}{1900}$	$\frac{1730}{1610}$	$\frac{8}{2,5}$	$\frac{20}{10}$	$\frac{0,35}{0,15}$	$\frac{0,09}{0,02}$
	400	$\frac{1400}{1250}$	$\frac{1220}{1050}$	$\frac{12}{6,0}$	$\frac{35}{10}$	$\frac{0,55}{0,20}$	$\frac{0,15}{0,02}$
40Х	200	$\frac{1980}{1800}$	$\frac{1700}{1500}$	$\frac{8}{3}$	$\frac{24}{12}$	$\frac{0,62}{0,36}$	$\frac{0,21}{0,05}$
40ХН	200	$\frac{2200}{1900}$	$\frac{1910}{1670}$	$\frac{6}{3}$	$\frac{20}{10}$	$\frac{0,60}{0,35}$	$\frac{0,20}{0,04}$
40ХНМ	200	$\frac{2400}{2100}$	$\frac{2190}{1870}$	$\frac{6}{1,2}$	$\frac{20}{8}$	$\frac{0,52}{0,32}$	$\frac{0,24}{0,12}$
	300	$\frac{1920}{1860}$	$\frac{1760}{1710}$	$\frac{10}{6}$	$\frac{40}{20}$	$\frac{0,60}{0,35}$	$\frac{0,28}{0,18}$
30	200	$\frac{1800}{1750}$	$\frac{1650}{1}$	$\frac{10}{5}$	$\frac{30}{10}$	$\frac{0,45}{0,14}$	$\frac{0,15}{0,10}$
	300	$\frac{1400}{1370}$	$\frac{1210}{1200}$	$\frac{16}{10}$	$\frac{40}{15}$	$\frac{0,8}{0,4}$	$\frac{0,35}{0,65}$

Примечание: в числителе – с обезводороживанием до ВТМО, в знаменателе – ВТМО непосредственно после спекания в водороде.

Установлено, что ВТМО снижает влияние водородного охрупчивания, однако обезводороживание спеченных заготовок приводит к значительному повышению комплекса механических свойств в высокопрочном состоянии.

Все исследованные стали после обезводороживания и термомеханической обработки имели более высокую вязкость по сравнению с контрольной обработкой во всем изученном интервале температур отпуска (200...600°C). Прирост KCU достигает 0,3 ... 0,4 МДж/м², а KCT – 0,2 ... 0,3 МДж/м².

Водородное охрупчивание значительно сказывается и на усталостную прочность, причиной которой является флокенообразование в процессе горячей деформации. Результаты влияния водородного охрупчивания на усталостную прочность цементованных сталей показали (табл. 2), что чем больше углерода в сердцевине, тем больше проявляется водородное охрупчивание на предел выносливости. Так, для стали П12ХН3А предел выносливости снижается от 720 до 650 МПа, т.е. на 70 МПа, а для стали П30ХН3А – от 960 до 790 МПа, т.е. на 170 МПа.

Микроструктурный анализ (рис. 3а) показал, что после ВТМО с температуры спекания (при увеличении x340) образуются многочисленные флокены. О причинах водородной хрупкости стали нет еще ясного представления.

Результаты многочисленных исследований в связи с образованием флокенов не всегда сравнимы и противоречивы. Известные на сегодня механизмы, посредством которых водород ухудшает свойства конструкционных сталей, можно разделить на следующие категории: 1) взаимодействие с дислокациями; 2) взаимодействие с межатомными связями в решетке; 3) создание очагов внутреннего давления; 4) образование гидридов.

Таблица 2

Влияние водородного охрупчивания на предел выносливости квазицементированных сталей

Обработка после спекания	σ_{-1} на базе 107 циклов, МПа				
	Материал сердцевинны				
	П20	П30	П12ХН3А	П20ХН3А	П30ХН3А
Обезводороживание, ВТМО	740	820	720	870	960
ВТМО с температу- ры спекания	630	690	650	700	790
КТО	590	620	620	680	740

При определенных условиях водород может пагубно влиять на характеристики разрушения большинства конструкционных сплавов. Классический пример – водородное охрупчивание высокопрочной мартенситной стали, являющееся результатом высокой концентрации водорода в металле. Со временем этот водород образует пузыри и трещины по внутренним поверхностям раздела границ зерен или включений и вызывает замедленное разрушение.

Этот вид охрупчивания, вызываемого водородом, находящимся в период пребывания сплава под действием внешней нагрузки (например, при горячей деформации в процессе ВТМО), называют внутренним водородным охрупчиванием. Оно характерно для большинства сплавов, используемых в машиностроении.

Неизбежность и специфика водородного охрупчивания при прямой ВТМО (деформация непосредственно с температуры спекания) заключается в следующем: при спекании (1150...1200°C) спрессованного брикета с пористостью 15...30% при избыточном атмосферном давлении водород растворяется в аустените (Fe_γ) и одновременно в молекулярном состоянии аккумулируется в порах.

Влияние водорода становится заметным в начальный момент пластической деформации и не сказывается в упругой области. Следует принять за основу явления, происходящие в результате совместного действия диффузии водорода и движения дислокаций. Водород образует твердый раствор внедрения, атомы его, подобно атомам углерода, располагаются в решетке преимущественно в местах ее нарушения, особенно в дислокациях. Пластическая деформация при комнатной температуре настолько ускоряет диффузию водорода, что он мигрирует за дислокациями и концентрируется в местах их скопления. При высоких напряжениях (нагрузках) водород выделяется в молекулярное состояние, причем давление его достигает большой величины. Таким путем водород облегчает в этих участках развитие разрыва металла до образования шейки на образце. В соответствии с этим с повышением содержания водорода относительное сужение уменьшается. Из табл. 1 видно, что для исследуемых сталей относительное сужение уменьшается в среднем в два раза.

Наиболее вероятными местами зарождения трещин считаются области объемного растяжения, сконцентрированные в вершинах мартенситных кристаллов, которые являются водородными ловушками с повышенной энергией взаимодействия по сравнению с границами зерен и дислокациями [6].

На флокеночувствительность сталей существенное влияние оказывают структурное состояние матрицы, в которой происходит распад остаточного аустенита, и содержание в ней водорода. Наиболее благоприятной структурой для образования микротрещин является мартенсит. В нем сохраняется наибольшее количество водорода, растворенного в стали при высоких температурах, а также обеспечивается максимальная подвижность при комнатной температуре. Вследствие этого напряженные объемы в мартенситной структуре, какими могут быть области объемного растяжения и другие дефекты, легко обогащаются водородом. Разрушение в таких случаях, как правило, происходит по границам зерен, где в основном концентрируются эти дефекты.

Эти гипотезы позволяют объяснить зависимость охрупчивания от температуры и скорости деформирования.

Если скорость деформирования настолько велика, что атомы водорода не могут больше следовать за распространением дислокаций, то охрупчивание не должно проявиться. При испытаниях, например, литых – компактных сталей на ударный разрыв охрупчивание вообще едва заметно.

Механизм водородного охрупчивания и его воздействие на структуру и свойства порошковых высокопрочных сталей имеет свои особенности и резко отличается от существующих закономерностей литых сталей. Основное воздействие на свойства оказывает не водород, находящийся в твердом растворе, а молекулярный водород, аккумулированный в порах. Естественно, механизм водородного охрупчивания порошковых сталей требует дальнейшего глубокого изучения.

ВЫВОДЫ

1. Исследованы механизм и кинетика водородного охрупчивания при создании высокопрочных порошковых сталей, в частности цементованных.

2. Установлено, что при прямой ВТМО порошковых сталей общее количество водорода, находящегося в виде твердого раствора внедрения и в молярном состоянии, аккумулированного в порах, может достигнуть 12...20 $\text{см}^3/100 \text{ г}$ металла. Это приводит к флокенообразованию (что подтверждают металлографические исследования) и ухудшению механических свойств, особенно при жестких методах испытаний:

П35 после КТО – $\text{KCU} = 0,25 \text{ МДж/м}^2$, $\text{KCT} = 0,08 \text{ МДж/м}^2$,

После ВТМО – $\text{KCU} = 0,4 \text{ МДж/м}^2$, $\text{KCT} = 0,2 \text{ МДж/м}^2$,

ВТМО после обезводороживания – $\text{KCU} = 0,6 \text{ МДж/м}^2$, $\text{KCT} = 0,4 \text{ МДж/м}^2$.

Аналогичные результаты получены для стали ПУ8.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Дорофеев Ю.Г., Гасанов Б.Г.** и др. Промышленная технология горячего прессования порошковых изделий. – М.: Металлургия, 1990.- 206 с.
2. **Дорофеев Ю.Г.** Динамическое горячее прессование пористых порошковых заготовок. – М.: Металлургия, 1977. – 216 с.
3. **Баглюк Г.А.** Уплотнение пористого материала при горячей штамповке в закрытом штампе с компенсатором // Порошковая металлургия.- 1998.- N 5 / 6.
4. **Johnson P.K.** Powder metallurgy technology review – 1991 //Int. I. Powder Metallurgy. – 1991. - V. 27, N 2.- P.163-167.
5. **Гудреман Э.** Специальные стали. Т. 1, 2. – М.: Металлургия, 1966. – 1273с.
6. **Декаменко В.М.** Механизм локального разрушения конструкционных сталей, содержащих водород //Интеркристаллитная хрупкость сталей и сплавов: Сб. науч. трудов / УНЦАН СССР. – Свердловск, 1987. –С. 145-149

ГИУА. Материал поступил в редакцию 4.11.2003.

Ս.Գ. ՄԱՄՅԱՆ, Ա.Վ. ԱՆԴՐԻԱՍՅԱՆ

ՋՐԱՇՆԱՅԻՆ ԲԵԿՈՒՆՈՒԹՅԱՆ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԸ ՓՈՇԵՊՈՂՊԱՏՆԵՐՈՒՄ ԲԱՐՁՐ ԶԵՐՄԱՄԵԽԱՆԻԿԱԿԱՆ ՄՇԱԿՄԱՆ (ԲԶՄՄ) ԺԱՄԱՆԱԿ

Սահմանված է, որ փոշեպողպատների անմիջական ԲԶՄՄ ժամանակ պինդ լուծույթում գտնվող և ծակոտիներում մոլեկուլյար վիճակում կուտակված ջրածնի ընդհանուր քանակությունը մետաղում կարող է հասնել $10...20 \text{ սմ}^3/100$ գրամ, ինչը հանգեցնում է ֆրկենագոյացմանը և մեխանիկական հատկությունների վատացմանը՝ հատկապես կոշտ փորձարկման պայմաններում:

S.G. MAMYAN, A.V. ANDRIASYAN

INVESTIGATION OF CRISPING IN POWDER STEELS

It is established that in direct HTTMT powder steels the whole amount of hydrogen as a solid solution and in the molar state, accumulated in pores may reach $10 \cdot 20 \text{ cm}^3/100\text{g}$ of metal. It results in formation of flakes and decrease of mechanical properties, especially with rigid test methods.

В.А. МАРТИРОСЯН, А.Ю. ШМАВОНЯН, Э.Р. АРАКЕЛОВА

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВНЕПЕЧНОГО АЛЮМИНОТЕРМИЧЕСКОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ ХРОМИТОВЫХ РУД С ПОЛУЧЕНИЕМ ФЕРРОХРОМА

На основе дериватографических и рентгеноструктурных методов анализа рассмотрены некоторые вопросы относительно кинетики и механизма процесса алюминотермического восстановления хромитового концентрата с получением феррохрома.

Ключевые слова: феррохром, хромит, алюминотермическое восстановление, хромитовые руды, шихта.

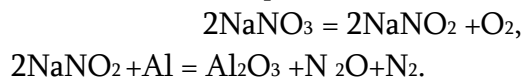
Энергоемкость и материалоемкость восстановительных процессов в производстве ферросплавов и лигатур требуют поиска эффективных технологий, позволяющих получить эти материалы из сравнительно дешевого сырья и дешевыми методами [1, 2]. К их числу следует отнести разработку технологии получения феррохрома внепечным алюминотермическим восстановлением местных хромитовых концентратов.

Опыты алюминотермического восстановления осуществлялись следующим образом. Шихта с навеской 10...15 г помещалась в огнеупорную керамическую чашу и зажигалась накаливаемой металлической проволокой. В качестве запала была взята смесь порошков Ti+C, которая служила инициатором реакции алюминотермического восстановления и началом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. С целью увеличения теплового баланса системы в шихту добавлялся также NaNO_3 . В процессе восстановления за счет экзотермической реакции развиваются высокие температуры (2500...3000°C), позволяющие провести внепечное восстановление. При этих экстремальных условиях шихта “кипит”, в результате чего восстановленные из хромита железо и хром растворяются, образуя шарики металлического феррохрома, а оксиды SiO_2 , Na_2O , K_2O , находящиеся в концентрате с Al_2O_3 , образуют трудноплавящиеся силикаты и алюмосиликаты в виде шлака, который при охлаждении легко отщепляется от металлических шариков феррохрома. Дериватографические исследования (Q-1500Д) проводились в условиях программированного нагрева до 1500° С со скоростью 15 град/мин. Продукты восстановления исследовали методом рентгенофазового анализа на дифрактомере ДРОН -2.

Так как шихта, подвергающаяся изучению, представляет собой сложную систему, состоящую из хромитового концентрата, NaNO_3 , Fe_2O_3 , CaO , SiO_2 и порошков алюминия, для полной оценки данного процесса были рассмотрены следующие системы: KNO_3+Al , $\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{FeO}+\text{Al}$, $\text{Cr}_2\text{O}_3+\text{SiO}_2+\text{Al}$, хромитовый концентрат+Al и шихта, т.е. смесь хромитового концентрата + $\text{NaNO}_3+\text{CaO}+\text{SiO}_2+\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{Al}$. CaO и SiO_2 добавлялись в шихту в качестве шлакообразующих компонентов.

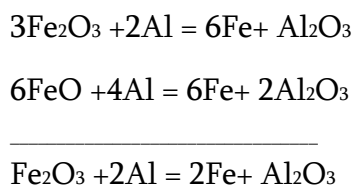
Для изучения этих систем были взяты химически чистые исходные вещества, а также хромитовый концентрат (53% Cr_2O_3 , 12,86% FeO), полученный гравитационным и флотационным обогащением хромитовых руд Севана (Cr_2O_3 -18...20%, FeO -10...15%).

На рис. 1а представлены кривые ДТА и TG, полученные при дериватографическом изучении системы $\text{NaNO}_3 + \text{Al}$. Как видно из кривой ДТА, процесс начинается с $\sim 450^\circ \text{C}$. При 500 (C на кривой наблюдается небольшой минимум, связанный с удалением влажности, которая на кривой TG почти не отражается. Температурный интервал 557...630 (C, как указывается в [3-5], связан с растрескиванием и снижением защитных свойств оксидного слоя. Причиной этого являются процессы рекристаллизации металла и кристаллизации аморфного оксида алюминия в $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$, происходящие по данным [4] именно в этом температурном интервале. Минимум на кривой ДТА при 610 (C совпадает с точкой плавления алюминия. Одновременно с этим скорость восстановления начинает резко возрастать, что сопровождается экзо- и эндозффектами, связанными с разложением и восстановлением NaNO_3 по реакциям:



Восстановительный процесс развивается бурно, достигая максимума при 1600 (C. Эта температура совпадает с точкой плавления Na_2O . Процесс разложения NaNO_3 на кривой TG сопровождается убылью веса ($\sim 20\%$).

На рис.1б показаны результаты дериватографического анализа системы $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO} + \text{Al}$. Как видно из кривой ДТА, развитие восстановительных процессов также связано с плавлением алюминия. Восстановительные процессы строго экзотермические и на ДТА имеют двухстадийный тепловой характер (820 и 1000°C), связанный с двухстадийным восстановлением Fe_2O_3 по реакциям



Это подтверждается и двухстадийным изломом на кривой TG, совпадающим с указанными температурами. Восстановительные процессы завершаются постадийным переходом $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-FeO-Fe}$. Относительная убыль веса в целом составляет $\sim 8\%$. На кривой ДТА различные экстремальные точки после 1000°C связаны с образованием межметаллических соединений Fe+Al в разных соотношениях.

Кривые ДТА и TG для системы $\text{Cr}_2\text{O}_3 + \text{Al}$ приведены на рис.1 в. Как видно из рисунка, убыль веса на кривой в начале процесса незаметна, хотя на кривой ДТА наблюдается минимум, связанный с удалением влажности. Далее, как и в предыдущем случае, процесс восстановления взаимно связан с началом плавления алюминия (660 (C).

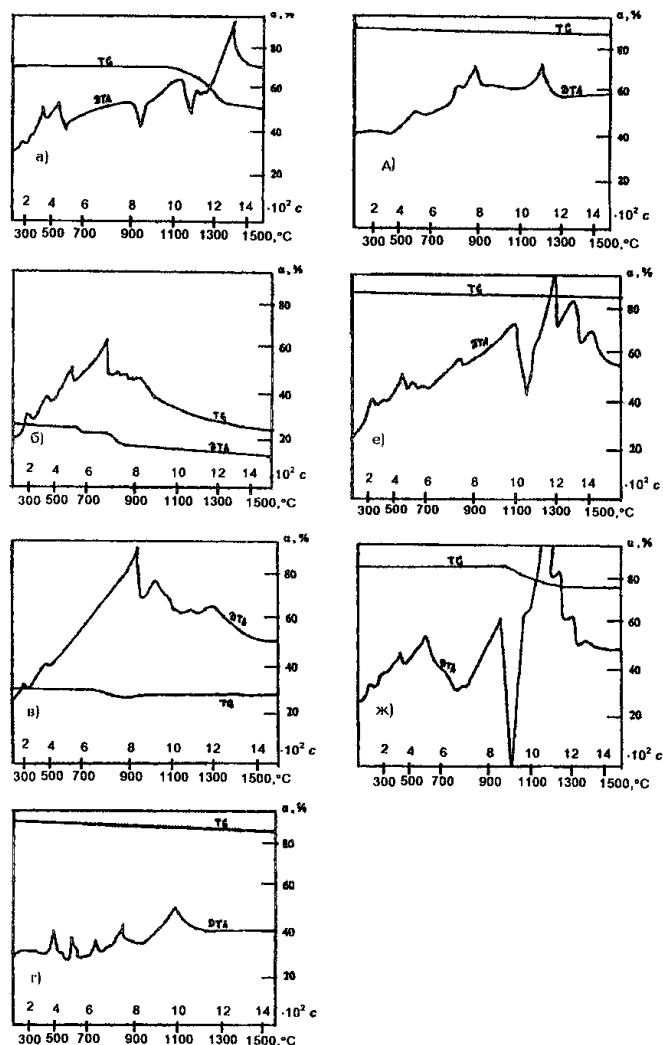


Рис.1. Дериватографические кривые DTA и TG для следующих систем:

- а - $\text{NaNO}_3 + \text{Al}$;
- б - $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO} + \text{Al}$;
- в - $\text{Cr}_2\text{O}_3 + \text{CrO}_3 + \text{Al}$;
- г - $\text{CaO} + \text{SiO}_2 + \text{Al}$;
- д - $\text{Cr}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2 + \text{Al}$;
- е - хромитовый концентрат + Al;
- ж - шихта

Во всех трех случаях после плавления алюминия инициируется самораспространяющийся высокотемпературный синтез, который сопровождается резким возрастанием восстановительных процессов. Причем эти процессы резко развиваются до 1500 °C и падают с образованием различных эндо- и экзоэффектов, связанных с переходами $2\text{CrO}_3 \rightarrow \text{Cr}_5\text{O}_{13} \rightarrow \text{Cr}_5\text{O}_{12} \rightarrow \text{CrO} \rightarrow \text{Cr}$, а также с получением межметал-

лических соединений Fe-Al. Убыль веса на кривой TG незаметна.

Были рассмотрены также процессы системы $\text{CaO} + \text{SiO}_2 + \text{Al}$ (рис.1 г) и $\text{Cr}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2 + \text{Al}$ (рис.1 д). Как видно из рисунков, в изученном температурном интервале не наблюдается восстановительных процессов. Процессы начинаются аналогичным образом, но тепловые эффекты в основном связаны с образованием различных силикатов и алюмосиликатов CaO (SiO_2 , $2\text{CaO}(\text{SiO}_2$ и др. (рис.1 г), а Cr_2O_3 и Al_2O_3 образуют между собой ряд бесконечно растворимых твердых растворов, которые имеют высокие точки плавления (рис.1 д) [1, 2]. Здесь также не наблюдается заметного спада кривой TG.

На рис.1 е представлены результаты дериватографических исследований системы хромитовый концентрат + Al. Как видно из кривой DTA, процессы

начинаются аналогичным образом. При этом подчеркивается, что восстановительные процессы начинаются параллельно с плавлением алюминия. Жидкий алюминий ускоряет этот процесс. Экзоэффект при 820°C связан с восстановлением FeO из шпинельной решетки. Одновременно наблюдаются эндоэффекты, связанные с разрушением кристаллической решетки шпинеля и образованием различных алюмосиликатов. Но экзо- и эндоэффекты восстановительных процессов при этом сливаются и особо не подчеркиваются. Процесс восстановления бурно ускоряется после полного восстановления железа и достигает максимума при 1300°C.

Ускорение восстановительных процессов здесь, по-видимому, связано с тем, что восстановленное железо является восстановителем и для Cr₂O₃. Кроме того, как указывается в литературе, железо, непрерывно растворяя хром, сдвигает равновесие протекающей реакции в сторону восстановительных процессов. Восстановление хрома протекает интенсивнее при сравнительно низких температурах (до 1300°C), чем в случае отдельного Cr₂O₃ (рис.1в). После завершения восстановительных процессов на кривой ДТА наблюдается экстремальное значение, связанное, по-видимому, с образованием феррохрома. В результате восстановительные процессы заканчиваются, и кривая ДТА резко снижается. Не наблюдается также заметного изменения кривой TG.

На рис.1 ж представлены кривые ДТА и TG для системы шихты, т.е. для смеси хромитовый концентрат + NaNO₃+ CaO+ SiO₂+ Al. Как видно из кривой ДТА, эти процессы аналогичны предыдущим, но восстановительные процессы здесь протекают более бурно. Это, по всей вероятности, связано с тем, что вначале реакция KNO₃+Al инициирует восстановительную реакцию за счет выделившейся теплоты. После 820°C восстановительные процессы сильно ускоряются, образуя большой экзоэффект, который зашкаливает, затем скорость процесса резко уменьшается. На кривой ДТА наблюдаются различные экзо- и эндоэффекты, связанные с образованием силикатов и алюмосиликатов.

По данным литературных источников [6, 7], межмолекулярное соединение феррохрома образуется при температуре выше 900°C. Полученные продукты восстановления подвергались рентгенографическому исследованию. В таблице представлены результаты данного анализа.

Таблица

Результаты рентгенографического анализа продуктов алюминотермического восстановления хромитового концентрата

0°	d, Å	Y/Y ₀ , %	Фазы
21,50	2,102	27	α -Fe
22,21	2,030	100	феррохром, α -Fe, Cr
40,75	1,180	36	Cr

Как видно из таблицы, полученный сплав представляет собой феррохром в твердом растворе α -Fe+Cr. В данном расплаве следов алюминия не наблюдается. Это доказывают и результаты спектрального анализа, где содержание алюминия составляет ~ 0,0001% .

Таким образом, результаты дериватографического анализа показали, что путем алюминотермического внепечного восстановления хромитового концентрата можно получить чистый феррохром.

Итак, восстановительные процессы начинаются с разрушения защитной пленки Al_2O_3 и образования жидкого алюминия, который активируется реакцией $NaNO_3 + Al$. Эта реакция строго ускоряет восстановительные процессы, и восстановление шихты протекает намного интенсивнее, чем без $NaNO_3$. Процесс восстановления Cr_2O_3 ускоряется с образованием железа, которое расходуется в качестве восстановителя, растворяя восстановленный хром и образуя феррохром.

Таким образом, дериватографическое изучение различных систем позволяет полностью раскрыть механизм алюминотермического восстановления хромитового концентрата с образованием феррохрома.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Елютин В.П., Павлов Ю.А., Левин Б.Е., Алексеев Е.М.** Производство ферросплавов // Электromеталлургия.-М.: Гос. науч.-техн. изд-во лит. по черн. и цветн. металлургии, 1957.- 278 с.
2. **Плинер Ю. Л. , Игнатенко Г.Ф.** Восстановление окислов металлов алюминием. –М.: Металлургия,1967.- 173 с.
3. **Плинер Ю.Л., Менделеевич А.Ю.** Закономерности растрескивания окисной пленки на алюминии при высокой температуре // Изв вузов. Цветн. металлургия.-1961.- № 3.-С 127-130.
4. **Локенбах А.К., Строд В.В., Лепинь Л.К.** Влияние исходного состояния на кинетику окисления высокодисперсных порошков алюминия // Изв. АН. ЛатвССР. Сер хим.-1981.- №1.-С. 50-58.
5. **Савицкий А.П.** Современные представления о процессах спекания в присутствии жидкой фазы // Порошковая металлургия. - 1987.- №8.
6. **Мармоштейн Л.В.** Сплавы железо-хром-алюминий.- М.: Металлургиздат, 1950. - 119 с.
7. Химическая физика процессов горения и взрыва. Горение конденсированных и гетерогенных систем: Материалы VI Всесоюзного симпозиума по горению и взрыву. Черногловка, 1980.-140 с.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 7.02.2003 .

Վ.Հ.ՄԱՐՏԻՐՈՍՅԱՆ, Ա.ՅՆԱՇՄԱՎՈՆՅԱՆ, Է.Ռ. ԱՌԱՔԵԼՈՎԱ
ԱՆՎԱՌԱՐԱՆ ԱԼՅՈՒՄԻՆԱՋԵՐՄԱՅԻՆ ՎԵՐԱԿԱՆԳՆՄԱՆ ԵՂԱՆԱԿՈՎ
ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ՔՐՈՄԻՏԱՅԻՆ ՀԱՆՔԱՆՑՈՒԹԵՐԻՑ ՖԵՐՈՔՐՈՄԻ ՍՏԱՑՄԱՆ
ԳՈՐԾԸՆԹԱՅԻ ՈՒՍՈՒՄՆԱՍԻՐՈՒԹՅՈՒՆԸ

Վերլուծության ջերմաձանրաչափական և ռենտգենական ուլտրալիցադրային մեթոդներով ուսումնասիրվում են քրոմիտային հանքանյութերից ալյումինաջերմային եղանակով ֆերոքրոմի վերականգնման գործընթացի կինետիկայի և մեխանիզմի հարցեր:

V.H. MARTIROSYAN, A.Y. SHMAVONYAN, E.R. ARAKELOVA
STUDIES ON NON-FURNACE ALUMINOTHERMAL REDUCTION PROCESS OF
CHROMICAL ORES GETTING FERROCHROME

Based on derivatographical and X-ray structural methods of analysis, some problems regarding kinetics and aluminothermal reduction of chromite concentrate and obtaining ferrochrome are investigated.

А.Н. КАРАПЕТЯН

ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА САМОСМАЗЫВАЮЩИХСЯ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ГЕТЕРОЦЕПНЫХ ПОЛИМЕРОВ

Приведены результаты исследования трибологических свойств композиций на основе гетероцепных полимеров, наполненных предварительно модифицированными армянскими минеральными наполнителями, такими как травертин, мрамор, бентонит и туф. Показано, что при введении модифицированных минеральных наполнителей в полиамиды 6 и 66, а также полифениленоксид (ПФО) значительно повышается их износостойкость (в 2,3... 2,7 раза) и снижается коэффициент трения (в 1,3...1,7 раза).

Ключевые слова: полимер, минеральный наполнитель, композит, коэффициент трения, износостойкость, фрикционный перенос.

Разработка и практическое применение новых композиционных самосмазывающихся материалов на основе многотоннажно выпускаемых гетероцепных полимеров приобретает все более актуальное значение для повышения качества, надежности и долговечности машин и механизмов. В связи с этим в качестве связующих использовались: полиамиды 6 и 66 (ПА-6, ПА-66) и полифениленоксид (ПФО), которые нашли применение в узлах трения для изготовления подшипников скольжения, зубчатых колес, направляющих станков и т.д. [1-5]. Однако эффективность применения данных материалов в чистом виде в различных трибосопряжениях ограничивается в связи с невысокими прочностными и теплофизическими свойствами. В сочетании с относительно высоким коэффициентом трения эти свойства в условиях "сухого" трения значительно ухудшают антифрикционные характеристики полимеров, тем более при сравнительно высоких скоростях скольжения ($V > 1,0 \text{ м/с}$) [6-10]. В связи с этим исследование закономерностей протекания трибологических процессов при трении композитов на основе гетероцепных полимеров и разработка на этой основе методов управления фрикционными свойствами представляют большой научный интерес для создания новых износостойких композитов. В качестве модификаторов применялись модифицированные армянские минеральные наполнители (МАН), такие как травертин, мрамор, бентонит и туф, обладающие повышенными смазывающими и адгезионными свойствами [11-13]. Модификация заключалась в том, что порошок минерального наполнителя смешивался в эксцентриковой вибромельнице совместно с органическими смазочными материалами: фторсодержащими олигомерами (фторалканами), стеариновой кислотой и волгонатом (алкансульфонат натрия).

Целью настоящей работы является исследование трибологических свойств гетероцепных полимеров, наполненных модифицированными армянскими минералами.

На основании результатов трибологических испытаний, проведенных на машине трения СМТ-1 по схеме "вал-частичный вкладыш", а также на машине

торцевого трения И-47 при скоростях от 0,25 до 5,0 м/с и в диапазоне нагрузок от 0,1 до 10,0 МПа, получены зависимости коэффициента трения, линейного износа и поверхностной температуры от продолжительности скольжения, позволяющие судить о скорости изнашивания и потерях на трение исследуемых материалов в период испытания. Результаты испытаний с оптимальным количеством наполнения МАМН показаны на рисунке.

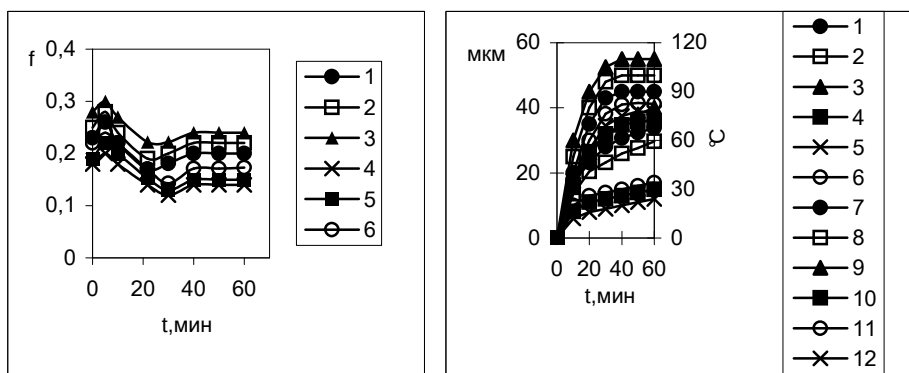


Рис. Зависимости коэффициента трения f , линейного износа (h) и поверхностной температуры θ от продолжительности скольжения по шлифованной поверхности ($R_a=1,25$ мкм) Стали 45 (48-52HRC) при удельном давлении $P_a=1,91$ МПа и скорости 0,78 м/с: 1(7) - ПА6; 2(8) - ПА66; 3(9) - ПФО; 4(10) - ПА6+30вес.%МАМН; 5(11) - ПА66+20вес.%МАМН; 6(12) - ПФО+30вес.%МАМН

Как следует из рисунка, при введении в ПА-6, ПА-66 и ПФО 30 и 20 вес.% МАМН значительно повышается их износостойкость (в 2,3...2,7 раза) и снижается коэффициент трения (в 1,3...1,7 раза), что во многом объясняется увеличением несущей способности композитов за счет большой прочности и жесткости наполнителей. При этом в процессе трения на металлической поверхности образуется прочная пленка фрикционного переноса (ФП), которая играет главную роль в механизме самосмазывания при их трении. С образованием пленки ФП наступает период установившегося износа, зависящего от свойств и долговечности самой пленки. Графическая зависимость коэффициента трения от продолжительности скольжения отражает процесс формирования пленки ФП на поверхности металлического контртела. Кинетика образования пленки ФП у всех исследуемых образцов одинакова, но нагрузочная способность пленок модифицированных материалов в данном режиме намного выше, чем у остальных материалов. Поэтому в установившемся режиме трения ($\theta=70...80^\circ\text{C}$) износ этих материалов практически прекращается.

Для сравнительной оценки трибологических свойств разработанных материалов и некоторых распространенных термопластичных полимеров, согласно обеим схемам трения, в таблице приведены обобщенные значения интенсивности изнашивания, коэффициента трения и поверхностной температуры от содержания наполнения.

Как видно из таблицы, наилучшими трибологическими свойствами по обеим схемам испытаний обладают одноименные композиции. Так, наиболее низкой интенсивностью изнашивания и наименьшим коэффициентом трения обладают композиции на основе ПА-6, ПФО и ПА-66, наполненные соответственно 30вес.% и 20вес.% МАМН. Триботехнические свойства исследуемых материалов при испытании по схеме торцевого трения несколько раз выше, чем при испытании по схеме "вал-частичный" вкладыш, что объясняется разными условиями теплоотвода и возможностями выноса частиц износа из зоны трения в связи с различными значениями коэффициентов взаимного перекрытия образцов ($K_{вз}=0,031$ для трения по схеме "вал-частичный" вкладыш и $K_{вз}=1$ для торцевого трения). Результаты испытаний показывают, что разработанные композиции по износостойкости превосходят распространенные материалы (табл.), сохраняя при этом коэффициент трения на одном уровне.

Таблица

Сравнительные триботехнические свойства разработанных материалов на основе гетероцепных полимеров [10-11]

Состав композиции вес. %	Интенсивность изнашивания $I \cdot 10^{-9}$	Коэффициент трения f	Температура на фрикционном контакте $\vartheta, ^\circ\text{C}$
ПА-6	12,2 / 46,5	0,24 / 0,30	90 / 100
ПА6+5% МАМН	10,8 / 38,3	0,22 / 0,28	90 / 95
ПА6+20% МАМН	8,0 / 31,6	0,17 / 0,24	80 / 85
ПА6+30% МАМН	5,2 / 20,2	0,14 / 0,20	70 / 80
ПА-66	10,5 / 48,3	0,22 / 0,31	100 / 125
ПА66+5% МАМН	10,0 / 42,5	0,26 / 0,32	100 / 105
ПА66+10% МАМН	7,2 / 28,5	0,20 / 0,28	90 / 100
ПА66+20% МАМН	4,8 / 18,2	0,16 / 0,22	80 / 90
ПФО	15,0 / 54,7	0,24 / 0,30	110 / 120
ПФО+5% МАМН	14,2 / 48,5	0,22 / 0,28	110 / 110
ПФО+20% МАМН	9,8 / 34,3	0,18 / 0,25	90 / 100
ПФО+30% МАМН	5,4 / 23,7	0,16 / 0,22	70 / 80
АТМ - 2	11,8 / 55,4	0,18 / 0,28	95 / 115
ПТФЭ	8,6 / 32,6	0,16 / 0,24	95 / 115
Эстеран - 51	9,42 / 38,2	0,25 / 0,35	90 / 110
СФД	10,29 / 45,8	0,16 / 0,23	90 / 110
СФД - ДМ	9,06 / 43,2	0,15 / 0,22	85 / 105
Хостаформ	10,12 / 46,2	0,15 / 0,22	90 / 110

В числителе указаны показатели испытания на машине трения СМТ-1 при трении по стали 45, (48-52HRC), $P_a=1,91\text{МПа}$ и $V=0,78\text{ м/с}$, а в знаменателе - на машине торцевого трения ИМ-58 при трении по стали 1Х13 (150-170 НВ), $P_a=0,2\text{МПа}$ и $V=1,7\text{м/с}$.

Таким образом, приведенные результаты свидетельствуют, что модифицированные армянские минеральные наполнители оказывают положительное влияние на трибологические свойства гетероцепных полимеров, повышая их износостойкость и снижая величину коэффициента трения в условиях исследованных нагрузок и скоростей. Полученные результаты представляют

большой научный интерес для повышения эксплуатационных параметров современной триботехнической системы.

Разработанные композиции рекомендуются для узлов трения в качестве втулок, подшипников скольжения, мелко модульных зубчатых колес, направляющих скольжения и т.д., эксплуатирующихся без смазки при значениях $PV \leq 2,5 \text{ МПа} \cdot \text{м/с}$, что значительно превосходит по этим показателям исходные полимеры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Белый В.А., Свириденко А.И.** и др. Трение и износ материалов на основе полимеров.- Минск: Наука и техника, 1976. - 431с.
2. Полимеры в узлах трения и механизмов: Справочник/ Под ред. **А.В.Чичинадзе**.- М.:Машиностроение,1980.- 208с.
3. **Погосян А.К.** Трение и износ наполненных полимерных материалов.- М.: Наука, 1977.- 139 с.
4. Триботехнические свойства антифрикционных самосмазывающихся пластмасс: Обзор информ. / Под ред. **Г.В. Сагалаева, Н.Л.Шембель** -М.: Изд. стандартов, 1982. - 62с.
5. Полимерные композиционные материалы – 95: Тез. докл. Межд. конф. "Поликом – 95." – Солигорск, 1995.
6. Новые материалы и технологии в трибологии: Тезисы 2-ой Америк.- Вост. евро. конф. НМТТ-97. - Минск. - Гродно- Варшава, 1997.
7. **Кацнельсон М.Ю., Балаев Г.А.** Полимерные материалы: Справочник. -Л.: Химия, 1982. - 315с.
8. **Струк В.А.** Трибохимическая концепция создания антифрикционных материалов на основе многотоннажно выпускаемых полимерных материалов: Автореф. дисс. ... докт. тех. наук. - Минск,1988. - 44с.
9. **Pogosian A.K., Karapetian A.N., Oganessian K.V.** Tribochemical processes and wear of composite polymer materials// Proc. of Inter. Conf. Wear of Materials, Denver USA - 1989. – Vol.2.- P. 521 - 528.
10. **Коршак В.В., Грибова И.А., Краснов А.П., Погосян А.К., Карапетян А.Н.** и др. Исследование трибохимических превращений при трении сополимера формальдегида с 1,3 - диоксоланом// Трение и износ. - 1988. – Т.9, N5.- С.773 - 778.
11. **Погосян А.К., Оганесян К.В., Карапетян А.Н., Багдасарян А.Э.** Антифрикционные композиционные полимерные материалы на основе СФД // Трение и износ.-1998.-Т.19, N1.- С.97-103.
12. **Карапетян А.Н.** Трибохимические процессы и антифрикционные свойства композиционных полимерных материалов: Тематический сб. науч. трудов / ГИУА.- Ереван. - 2002. - Т.1. - С.199 - 200.
13. **Karapetyan A., Hovhannisyan K., Gevorgyan G.** Study of Metal/ Polymer Tribocontacts Longevity Based on Frictional Transfer Phenomenon// Proc. of the 47 Inter. Scientific Kolloquium. "Mechanical Engineering and Nanotechnology - The High Technologies of the 21st Century". Ilmenau, 2002. - P.67- 68.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 30.11.2002.

Ա.Ն. ԿԱՐԱՊԵՏՅԱՆ

**ՀԵՏԵՐՈՑԻԿԼԱՅԻՆ ՊՈԼԻՄԵՐՆԵՐԻ ՀԻՄՔՈՎ ԻՆՔՆԱՅՈՒՂՎՈՂ
ԿՈՄՊՈԶԻՏՆԵՐԻ ՇՓԱԳԻՏԱԿԱՆ ՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԸ**

Բերված են նախապես ձևափոխված հայկական հանքանյութերով (տրավերտին, մարմար, բենտոնիտ, տուֆ) լցավորված ջերմապլաստիկ հետերոցիկլային պոլիմերների հիմքով կոմպոզիտների շփագիտական հատկությունների հետազոտության արդյունքները: Ցույց է տրված, որ պոլիամիդ 6-ը և 66-ը, ինչպես նաև պոլիֆենիլենօքսիդը ձևափոխված հայկական հանքանյութերով լցավորելու դեպքում զգալիորեն (2,3...2,7 անգամ) մեծանում է նրանց մաշակայունությունը և 1,3...1,7 անգամ նվազում շփման գործակիցը:

A.N. KARAPETYAN

**TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF SELF-LUBRICATED COMPOSITES BASED
ON HETEROCHAIN POLYMERS**

Investigation results of tribological properties based on heterochain polymer composites filled with modified Armenian modified mineral fillers such as travertine, marble, bentonite and tuff are considered. It is shown that when the modified mineral fillers are inserted into the polyamids 6 and 66 as well as polyphenilenoxide the wear resistance considerably increases (2,3...2,7 times) and the friction coefficient decreases (1,3...1,7 times).

Т. Г. АФРИКЯН

ОЦЕНКА РАБОТОСПОСОБНОСТИ ШЛИФОВАЛЬНЫХ КРУГОВ С ХАОТИЧНЫМ И ОРИЕНТИРОВАННЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ АЛМАЗНЫХ ЗЕРЕН

На основе экспериментальных исследований дана оценка работоспособности шлифовальных кругов с хаотичным и ориентированным распределением алмазных зерен. Показано, что удельный расход алмазных кругов с ориентированными зернами в 1,41, а высота микронеровностей отшлифованной поверхности в 1,4 раза меньше, чем кругов с хаотичным распределением алмазных зерен. При одинаковых требованиях к шероховатости отшлифованной поверхности круги с ориентированными зернами позволяют увеличить производительность процесса шлифования в 1,5 раза за счет увеличения скорости изделия.

Ключевые слова: шлифовальный круг, алмазные зерна, абразивный материал.

В [1] показано, что при ориентации алмазных зерен в связке работоспособность шлифовальных кругов (ШК) существенно возрастает, соответственно снижается и удельный расход алмаза.

На рис. 1 показано единичное зерно в связке, где h_1 - резерв износа зерна; h_2 - высота выступающей части зерна; h_3 - номинальная глубина заделки зерна.

При перпендикулярном расположении зерна относительно плоскости резания коэффициент использования абразивного материала равен

$$K'_и = h_1 / H. \quad (1)$$

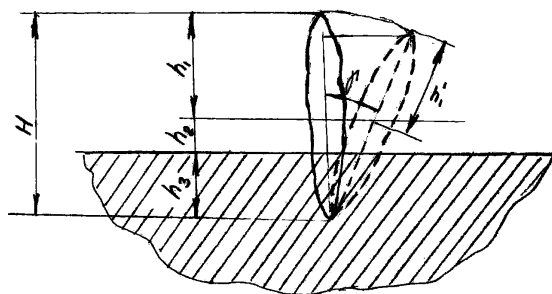


Рис. 1. Расчетная схема определения изменения коэффициента использования абразивного материала

Рассмотрим, как изменяется $K'_и$ в случае, если зерно располагается под углом относительно плоскости резания. Пусть абразивное зерно отклонено под углом γ от начального положения. Тогда

$$K_и = \frac{h_1 - (H - H \cos \gamma)}{H} = \frac{h_1}{H} - (1 - \cos \gamma). \quad (2)$$

При формировании алмазонасного слоя традиционным способом закон распределения близок к равновероятному; в этом случае $\gamma_{\text{ср}} \approx 45^\circ$ [2]. Подставив это значение в формулу (2) и приняв среднее значение $K_{\text{и}} \approx 0,05$, по данным [3] получим $K'_{\text{и}} = 0,35$.

Таким образом, если в ШК абразивные зерна по высоте ориентированы по нормали рабочей поверхности и распределены равномерно, коэффициент использования зерна возрастает почти в 7 раз по сравнению с ШК, в которых зерна расположены хаотично.

Под работоспособностью ШК понимается количественная оценка (по одному или нескольким показателям) степени соответствия круга своему назначению при выполнении той или иной операции. Количественная оценка отдельных показателей осуществляется непосредственным измерением или путем сравнения результатов эксперимента с некоторыми значениями параметров, принятыми за единицу [4].

Удельный расход алмаза (Q – основной показатель износостойкости шлифовального инструмента) представляет собой отношение массы израсходованного алмаза к объему снятого обрабатываемого материала. Для определения удельного расхода ШК принят метод взвешивания, предусматривающий точное взвешивание шлифовального инструмента до и после выполнения заданного объема работы. Основным недостатком этого метода является трудность исключения при взвешивании погрешностей, вызванных влиянием массы продуктов шлифования в смазывающей охлаждающей жидкости (СОЖ). При работе может происходить заполнение пор алмазонасного слоя отходами шлифования и налипание материала обрабатываемого изделия, что увеличивает массу круга. Эти и другие недостатки в значительной мере исключаются при применении метода измерения линейного износа алмазонасного слоя круга. Более производительным является метод врезания лунки [5], при котором периодически измеряется хорда, образующая дугу лунки. По замерам хорды расчетным путем определяется глубина лунки, т.е. износ круга.

При широком применении ШК из алмазов и других сверхтвердых абразивных материалов, изнашивающихся с малой интенсивностью, а также использовании электрофизических методов вскрытия зерен важной задачей становится разработка новых методов определения износа ШК. В [6] предложен новый метод, на основе которого проведены исследования износа и удельных расходов алмаза ШК. В экспериментах использовался плоскошлифовальный станок модели 3Г71, оборудованный гидравлической продольной подачей стола. Эксперименты осуществлялись при обработке технического стекла (ГОСТ 26302-84), а также твердого сплава марки ВК6 (ГОСТ 3882-74) и гранита Памбакского. Круги 150x20x15 изготовлены на органической связке В2-01 из алмазов АС15 зернистостью 125/100 и 100%-ной концентрации. Обработка велась всухую, т.е. без применения СОЖ. Размеры образцов технического стекла и гранита – 150x90x6 мм.

Перед обработкой и после нее на отдельной пластинке вышлифовывали лунки. Размеры ℓ_1 и ℓ_k измеряли на инструментальном микроскопе УМИ-2Ц с цифровым указателем УЦМ-1М. Режимы резания следующие: окружная скорость круга $V_k = 22$

м/с, продольная подача стола $S_{пр}=0,27...0,54$ см/об, поперечная подача $S_{поп}=0,6$ мм/дв.ход (для твердого сплава ВК6 $S_{поп}=0,1$ мм/дв.ход), глубина резания $t=0,004$ мм.

Зная концентрацию алмазов в алмазоносном слое, можно определить количество израсходованного алмаза, а следовательно, удельный расход. Испытание кругов проводилось на материалах твердого сплава ВК6, гранита Памбакского и технического стекла.

Результаты удельных расходов алмазов в зависимости от продольной подачи $S_{пр}$ при шлифовании сплава ВК6 приведены в табл. 1 и на рис. 2.

Таблица 1

Определение коэффициента уменьшения удельного расхода алмазов при обработке твердого сплава ВК6

$S_{пр}$, см/об	Удельный расход, мг/см ³						Коэффициент уменьшения удельного расхода	
	Круг с ориентир. зернами		Невязка	Круг с неориентир. зернами		Невязка		
	Q_1	$\hat{Q}_1$	$\Delta Q_1=Q_1-\hat{Q}_1$	Q_2	$\hat{Q}_2$	$\Delta Q_2=Q_2-\hat{Q}_2$	K_1	$\hat{K}_1$
0,27	1,0	0,93	-0,07	1,4	1,32	-0,08	1,40	1,14
0,4	2,2	2,56	+0,36	3,2	3,67	+0,47	1,45	1,43
0,54	6,1	5,55	-0,45	8,7	8,02	-0,68	1,42	1,44
	$K_{ср}$						1,42	1,33

Обработка результатов эксперимента. Так как полученные зависимости $Q = 7(S_{пр})$, $R_a = 7(S_{пр})$ монотонные, то результаты эксперимента аппроксимируются степенными функциями:

$$Q = C_1 S_{пр}^{A_1}, \quad R_a = C_2 S_{пр}^{A_2}.$$

Методом наименьших квадратов по специально разработанным программам на ЭВМ находятся постоянные C_1 , C_2 и показатели степеней A_1 и A_2 для разных материалов [2]. Разность между экспериментальными и вычисленными значениями по уравнению регрессии называется невязкой [7].

Как и следовало ожидать, при работе алмазными кругами с ориентированными зернами с увеличением $S_{пр}$ удельный расход алмазов возрастает. Однако удельный расход алмазов у кругов с ориентированными зернами в $\sim 1,4$ раза ниже, чем у кругов с неориентированными зернами.

Качество обработанной поверхности характеризуется физико-механическими свойствами поверхностного слоя, остаточными напряжениями, действующими в этом слое, и шероховатостью поверхности. Применяемые в настоящее время методы оценки можно подразделить на прямые и косвенные. Для прямой оценки шероховатости применяют щуповые (профилографы – ИЗП-5, ИЗП-17, профилометры – КВ7, КВ7М, П4-3; профилографы-профилометры – 201, 202, 252, 253) и оптические приборы (двойной микроскоп – МИС-11, ПСС-2, микроинтерферометры

– МИИ-4, МИИ-9, МИИ-10), для косвенной - эталоны шероховатости и интегральные методы.

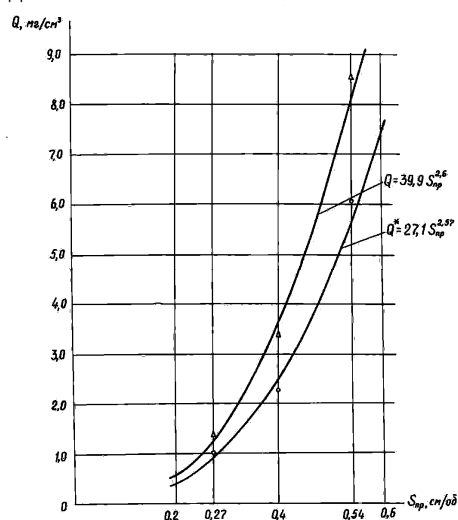


Рис.2. Зависимость удельного расхода алмазов от $S_{пр}$ при обработке твердого сплава ВК6;
* - круг с ориентированными зернами

Измерение шероховатости обработанных поверхностей образцов производилось профилографом-профилометром модели 252, изготовленным заводом “Калибр”. Шероховатость определялась средним арифметическим отклонением микронеровностей профиля, т.е. по параметру R_a . Измерение производилось на 5...8 различных (по направлению к месту расположения) трассах ощупывания поверхности. Длина трассы ощупывания – 3 мм, отсечка шага прибором производилась через 0,25 мм.

Все данные по шероховатости поверхности получены среднеарифметическим способом из 15...24 измерений (табл. 2).

Как видно из рис.3, при увеличении $S_{пр}$ чистота обработанных поверхностей ухудшается. При обработке кругами с ориентированными зернами чистота поверхности выше, чем кругами с неориентированными зернами. Для различных материалов коэффициент уменьшения шероховатости составляет $K_{ср} \approx 1,4$.

Таблица 2

Определение коэффициента уменьшения шероховатости поверхности при обработке твердого сплава ВК6

$S_{пр},$ см/об	Шероховатость поверхности, мкм						Коэффициент уменьшения шероховатости поверхности	
	Круг с ориентир. зернами		Невязка	Круг с неориентир. зернами		Невязка		
	R_{a1}	$\hat{R}_{a1}$	$\Delta R_a = R_{a1} - \hat{R}_{a1}$	R_{a2}	$\hat{R}_{a2}$	$\Delta R_a = R_{a2} - \hat{R}_{a2}$	K_2	$\hat{K}_2$
0,27	0,13	0,13	0	0,18	0,18	0	1,39	1,39
0,40	0,17	0,17	0	0,22	0,21	+0,01	1,39	1,36
0,54	0,18	0,19	-0,01	0,25	0,24	+0,01	1,41	1,36

						K_{cp}	1,39	1,37
--	--	--	--	--	--	----------	------	------

Как показали исследования, при обработке кругами с ориентированными зернами чистота поверхности повышается. При одинаковых шероховатостях продольная подача ($S_{пр}$) кругов с ориентированными зернами значительно выше (рис.3), следовательно, выше и производительность шлифования.

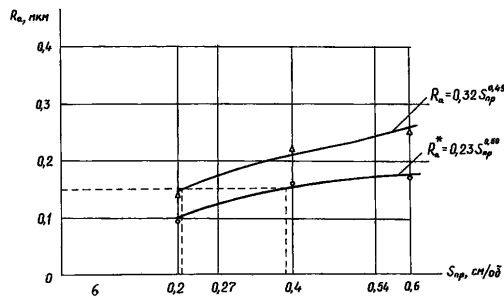


Рис.3. Зависимость шероховатости поверхности от $S_{пр}$ при обработке твердого сплава ВК6; Δ , $\circ$ - экспериментальные точки; * - круг с ориентированными зернами

Обозначив продольную подачу через $S_{пр2}$ - для кругов с ориентированными зернами и $S_{пр1}$ - для кругов с неориентированными зернами и разделив $S_{пр2}$ на $S_{пр1}$, получим коэффициент повышения производительности шлифования [2]:

$$K_{пп} = \frac{S_{пр2}}{S_{пр1}} = \frac{A_2 \sqrt[A_2]{\frac{R_a^*}{C_2}}}{A_1 \sqrt[A_1]{\frac{R_a}{C_1}}} = \frac{R_a^* \frac{1}{A_2} C_1^{\frac{1}{A_1}}}{R_a^{\frac{1}{A_2}} C_2^{\frac{1}{A_2}}}$$

При обработке технического стекла для обеспечения шероховатости $R_a = 0,15$ получено

$$K_{пп} = \frac{S_{пр2}}{S_{пр1}} = \frac{R_a^{0,85} \cdot 0,46^{\frac{1}{0,89}}}{R_a^{0,89} \cdot 0,31^{\frac{1}{0,89}}} = 1,49;$$

при обработке твердого сплава ВК6 ($R_a = 0,15$):

$$K_{пп} = \frac{S_{пр2}}{S_{пр1}} = \frac{R_a^{\frac{1}{0,5}} \cdot 0,32^{\frac{1}{0,49}}}{R_a^{\frac{1}{0,49}} \cdot 0,23^{\frac{1}{0,5}}} = 1,61;$$

при обработке гранита Памбакского ($R_a = 0,38$):

$$K_{пп} = \frac{S_{пр2}}{S_{пр1}} = \frac{R_a^{\frac{1}{0,71}} \cdot 1,01^{\frac{1}{0,73}}}{R_a^{\frac{1}{0,73}} \cdot 0,72^{\frac{1}{0,71}}} = 1,55.$$

Таким образом, при прочих равных условиях производительность ШК с ориентированными зернами в $\sim 1,5$ раза выше, чем базовых кругов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Мартиросян Р.Б.** Резервы повышения производительности шлифовальных кругов и пути их реализации // Докл. Межд. конф. “Шлифование-2”.- Братислава. – 1987. - Ч. 2. - С. 23-29.
2. **Африкян Т.Г.** Разработка и исследование технологии изготовления шлифовального круга с ориентированными алмазными зернами: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Тбилиси, 1988. – 22 с.
3. **Лоладзе Т.Н., Бокучава Г.В.** Износ алмазов и алмазных кругов. – М.: Машиностроение, 1967. – 112 с.
4. **Лурье Г.Б.** Шлифование металлов. – М.: Машиностроение, 1969. – 175 с.
5. **Бобров В.Ф.** Влияние угла наклона главной режущей кромки инструмента на процесс резания металлов. – М.: Машгиз, 1962. – 106 с.
6. А.с. N 542938 (СССР). Способ измерения износа поверхности / **Р.Б. Мартиросян, Р.В. Князян, С.Р. Маркарян.** – Оpubл. в Б.И.- 1977. – N2.
7. **Касьян М.В., Багдасарян Г.Б., Арутюнян Г.А.** Оптимизация режимов резания при решении технологических задач. – Ереван: Айастан, 1981. – 184 с.

Гаварский государственный университет. Материал поступил в редакцию 25.01. 2002 .

S.Z. ԱՖՐԻԿՅԱՆ

ԿՈՂՄՆՈՐՈՇՎԱԾ ԵՎ ՔԱՈՍԱՅԻՆ ԴԱՍԱՎՈՐՈՒԹՅԱՄԲ ԱԼՄԱՍՏԵ ՀԱՏԻԿՆԵՐՈՎ ՀՂԿԱՔԱՐԵՐԻ ԱՇԽԱՏՈՒՆԱԿՈՒԹՅԱՆ ԳՆԱՀԱՏՈՒՄԸ

Փորձնական հետազոտությունների հիման վրա գնահատված է կողմնորոշված և քառսային դասավորությամբ ալմաստե հատիկներով հղկաքարերի աշխատունակությունը: Ցույց է տրված, որ կողմնորոշված ալմաստե հատիկներով հղկաքարերի ալմաստի տեսակարար ծախսը 1,41, իսկ մշակված մակերևույթի միկրոանհարթությունների բարձրությունը 1,4 անգամ փոքր են ալմաստե հատիկների քառսային դասավորությամբ հղկաքարերի համեմատությամբ: Հղկված մակերևույթի անհարթություններին ներկայացվող միևնույն պահանջների դեպքում կողմնորոշված հատիկներով հղկաքարերը հնարավորություն են ընձեռում շինվածքի արագության մեծացման հաշվին 1,5 անգամ մեծացնել հղկման գործընթացի արտադրողականությունը:

T.G. AFRIKYAN

GRINDING WHEEL SERVICEABILITY ESTIMATION WITH RANDOM ORIENTED DISTRIBUTION OF DIAMOND GRAINS

Based on experimental investigations the grinding wheel serviceability with random and oriented distribution of diamond grains is given. It is shown that the specific consumption of diamond wheels with oriented grains for 1.41 and micro rough ground surface height is for 1.4 times smaller than the wheels with random distribution of diamond grains. With similar requirements to randomness of the ground surface the wheels with oriented grains permit to increase productivity of the grinding process for 1.5 times at the expense of speed increase.

Ո.Զ. ՄԱՐՈՒԽՅԱՆ, Տ.Ս. ԹԱԹԻԿՅԱՆ

ՀՀ ԷՆԵՐԳԱՀԱՄԱԿԱՐԳԻ ԷԼԵԿՏՐԱԿԱՅԱՆՆԵՐԻ ՄԻՋԵՎ
ԷԼԵԿՏՐԱԿԱՆ ԲԵՌԻ ԲԱՇԽՄԱՆ ԼԱՎԱՐԿՈՒՄԸ

Դիտարկված է էներգահամակարգի տարբեր էներգառեսուրսներ սպառող էլեկտրակայանների միջև էլեկտրական բեռի բաշխման լավարկման խնդիրը, առաջարկված է որպես բեռի լավագույն բաշխման չափանիշ ընդունել դրամական նվազագույն ծախսերի ապահովումը: Բեռի բաշխումից կախյալ ծախսերի թվին են դասվել էներգակիրների արժեքը, քիմիական ազդանյութերի արժեքը և շրջակա միջավայրի պահպանության հետ կապված ծախսերը: Բեռի լավագույն բաշխումը ստացվել է էլեկտրակայանների փոփոխական ծախսերի հավասարումներն ըստ էլեկտրակայանների հզորության դիֆերենցելու միջոցով: Ձևակերպվել է բեռի լավագույն բաշխման պայմանը:

Առանցքային բառեր. էներգահամակարգ, էլեկտրակայաններ, էներգակիրներ, բեռի բաշխում, ծախսեր, լավարկում, շրջակա միջավայր:

Էլեկտրակայանների գներատորների միջև էլեկտրական բեռի լավագույն բաշխումը լավարկման առաջին փուլն է, որը հիմնված է վառելիքի (ջրի) հարաբերական աճերի մեթոդի վրա: Այդ փուլում լավարկման խնդրի լուծումը բավականին պարզ է, քանի որ նույն էլեկտրակայանում տուրբազեններատորների ծախսերն արտահայտվում են միևնույն էներգակիրների քանակների միջոցով, իսկ դրանց հարաբերական աճերի բնութագրերի կառուցումը բարդ չէ [1,2,5]:

Էներգահամակարգի մասշտաբով լավարկում կատարելիս անհրաժեշտ է էլեկտրական բեռը բաշխել տարբեր էներգառեսուրսներ սպառող էլեկտրակայանների միջև, ըստ որում՝ բաշխման յուրաքանչյուր տարբերակի դեպքում պետք է հաշվի առնել դրան համապատասխանող էլեկտրաէներգիայի կորուստը էլեկտրահաղորդման համակարգում: Ուստի ընդհանուր դեպքում որպես բեռի լավարկված բաշխման չափանիշ նպատակահարմար է ընդունել տվյալ ժամանակահատվածին վերագրվող շահագործման դրամական ծախսերի (այսուհետև՝ ծախսերի) նվազագույն արժեքի ստացումը: Շահագործման ծախսերի և էլեկտրական համակարգի ռեժիմների կառավարման միջև կապը կարելի է արտահայտել

$$\bar{O} = \bar{O}_0 + \bar{O}(P) \quad (1)$$

արտահայտությամբ, որտեղ $\bar{O}_0$ բաղադրիչն ընդգրկում է էլեկտրական համակարգի ռեժիմներից աննշան կախում ունեցող ծախսերը, ինչպես օրինակ, շահագործող անձնակազմի աշխատավարձը, սարքավորման կատարելագործման միջոցով հուսալի և խնայողական աշխատանք ապահովելու նպատակով կատարվող ծախսերը և այլն, $\bar{O}(P)$ բաղադրիչը՝ համակարգի ռեժիմներից կախում ունեցող ծախսերը (գլխավորապես էներգակիրների արժեքը, որոշ դեպքերում նաև բնապահպանական ծախսերը [3,4]):

Ըստ որում, ՋԷԿ-ի համար էներգակիր է օրգանական վառելիքը, ԱԷԿ-ի համար՝ միջուկային վառելիքը, ՀԷԿ-ի համար՝ ջուրը:

Սահմանափակ ջրային ռեսուրսների դեպքում, ծախսերի նվազեցման նպատակով, անհրաժեշտ է լավագույն ձևով օգտագործել ջրամբարում ջրի կուտակման հնարավորությունը, ուստի ընդհանուր դեպքում պետք է դիտարկվի ՀԷԿ-ի բեռնավորման գրաֆիկը՝ ջրի մուտքի և ելքի հաշվեկշռի պահպանման սահմաններում:

Էներգահամակարգի P_i^t գումարային ակտիվ բեռը ժամանակի t պահին պայմանավորված է էլեկտրաէներգիայի սպառիչների պահանջարկով և դիտարկվում է որպես արտաքին ազդեցության գործոն հանդիսացող տրված պարամետր: Էլեկտրական ցանցի տարրերում հզորության կորուստները հաշվի առնելու դեպքում ժամանակի յուրաքանչյուր t պահի համար պետք է պահպանվի հզորության հավասարակշռության պայմանը՝

$$\sum_{i=1}^n P_i^t - P_\mu^t - \Delta P^t = 0, \quad (2)$$

որտեղ P_i^t -ն i -րդ աղբյուրի ակտիվ հզորությունն է ժամանակի t պահին, (P_μ^t -ն՝ էլեկտրական համակարգում ակտիվ հզորության գումարային կորուստը: Ակտիվ հզորության կորուստը ֆունկցիա է էլեկտրական համակարգի ռեժիմից և կարող է բնութագրվել հանգուցային լարումների հավասարումներով, որոնք մատրիցային տեսքով ներկայացվում են հետևյալ կերպ.

$$[Y]U = (S / \hat{U}): \quad (3)$$

Այստեղ $[Y]$ -ն հաղորդականությունների մատրիցն է, $\hat{U}$ - ն՝ հանգույցների լարումների վեկտորը, S -ը՝ լրիվ հզորության վեկտորը (այստեղ և հետագայում ընդունվում է, որ $S_i = P_i - j Q_i$):

Աջ կողմի վեկտորի բաղադրիչները ստացվում են հանգուցային S_i հզորությունները համապատասխան լարումների վրա բաժանելով: Փաստորեն (3) հավասարումներն արտահայտում են հոսանքների հաշվեկշիռը հանգույցում և գրվում են բոլոր հանգույցների համար, բացի հենակետայինից, որի լարումը պետք է տրված լինի: Եթե որպես հենակետային և հավասարակշռող ընդունվի նույն հանգույցը՝ U_h լարումով, ապա (3) համակարգը կարելի է ներկայացնել

$$\sum_{j=1}^{n+m} Y_{ij} U_j = S_i / \hat{U}_i - Y_{ih} U_h, \quad i = 1, 2, \dots, n+m \quad (4)$$

տեսքով, որտեղ m -ը բեռի հանգույցների թիվն է, իսկ n -ը՝ գեներատորային հանգույցների թիվը (առանց հաշվեկշռող հանգույցի):

(2) պայմանը պետք է ապահովվի համակարգում հոսանքի նորմալ հաճախության դեպքում:

Էներգակրի B_i ծախսը ցանկացած i -րդ էլեկտրակայանում կախված է նրա հզորությունից և աշխատող սարքավորման կազմից, ընդ որում՝ երկու պարամետրերն էլ ժամանակից կախված կարող են լինել փոփոխական: Հետևաբար՝ T ժամանակահատվածում էներգահամակարգի ռեժիմներից կախում ունեցող գումարային ծախսերը ժամանակի ֆունկցիա (ֆունկցիոնալ) են՝

$$\mathcal{O}(P) = \sum_{i=1}^{N_t} \alpha_i \int_0^T B_i(t) dt, \quad (5)$$

որտեղ α_i - ն գործակից է, որը հաշվի է առնում էներգակրի արժեքը, ինչպես նաև էներգակրի ծախսին հարակից և դրան համեմատական այլ ծախսեր (օրինակ՝ շրջակա միջավայրի պահպանության նպատակով կատարված ծախսերը), N_k -ն էլեկտրակայանների թիվն է:

Հիդրոռեսուրսների լրիվ օգտագործումը T ժամանակահատվածում համապատասխանում է

$$\sum_{i=1}^{N_h} \left(\int_0^T H_i(t) dt - \Theta_j \right) = 0 \quad (6)$$

պայմանին, որտեղ N_h -ն ՀԷԿ-երի թիվն է, $H_i(t)$ -ն ջրի ծախսն է որպես ժամանակից ֆունկցիա, որը համապատասխանում է ՀԷԿ-ի ակտիվ բեռին, Θ_j -ն ջրի հայտնի (T ժամանակահատվածի համար պլանավորվող) պաշարն է (հոսքը) j - րդ ՀԷԿ-ում:

Այսպիսով՝ էներգահամակարգի ռեժիմի լավարկման խնդիրը համապատասխանում է (5) արտահայտության համար $\overline{O}(P)_{\min}$ - ի արժեքի որոնմանը՝ (6) պայմանի կատարման դեպքում: Այդ պայմանը կապում է փոփոխականները ժամանակի մեջ և նշանակում է, որ ժամանակի որևէ պահին ռեժիմի պարամետրերի լավագույն արժեքը հնարավոր չէ որոշել միայն համակարգի մասին ընթացիկ տեղեկատվությամբ. այն պետք է հաշվարկվի՝ հաշվի առնելով նրա հետագա գործելակերպը: Նման ընդհանուր խնդրի լուծումը, որը պատկանում է տարբերակայինների դասին, դժվար է մեծ բարդության պատճառով:

Խնդրի լուծումը հնարավոր է իրագործել որոշ մոտավորությամբ, եթե, ելնելով էներգահամակարգի հնարավոր ռեժիմներից, սահմանափակումներ մտցվեն փոփոխական մեծությունների արժեքների և թվաքանակի մեջ և հնարավորինս փոքրացվի փոփոխական մեծությունների դաշտը, ինչպես նաև կիրառվեն նախնական գնահատումներով աստիճանական մոտեցմամբ (իտերացիոն) լուծումներ: Այսպիսով, լավարկման նպատակն է՝ ռեժիմների թույլատրելի տիրույթում (որը սահմանափակվում է հիմնականում անհավասարությունների տեսքով) գտնել ֆունկցիայի էքստրեմումը:

Ակտիվ և ռեակտիվ բեռի փոփոխման սահմաններն են՝

$$P_{i \min} \leq P_i \leq P_{i \max}, \quad (7)$$

$$Q_{i \min} \leq Q_i \leq Q_{i \max}: \quad (8)$$

Հանգույցների լարումները նույնպես պետք է տրվեն թույլատրելի սահմաններում՝ հաշվի առնելով կարգավորման տիրույթը.

$$U_{i \min} \leq U_i \leq U_{i \max}: \quad (9)$$

Էլեկտրահաղորդման գծերում հոսանքի ուժերը և հզորության հոսքերը չպետք է գերազանցեն թույլատրելի արժեքները՝

$$I_i \leq I_{i \max}, \quad (10)$$

$$P_i \leq P_{i \max}: \quad (11)$$

Քանի որ էներգահամակարգի միևնույն P_F ակտիվ բեռի դեպքում էլեկտրակայանների բեռը վերաբաշխելիս ակտիվ հզորության ΔP գումարային կորուստը փոփոխվում է, այդ բեռը ծածկելու համար էլեկտրակայանների գումարային բեռը կլինի տարբեր: Այդ տարբերությունների պատճառով յուրաքանչյուր էլեկտրակայանի բեռի կրկնակի փոփոխելուց և վերահաշվարկելուց խուսափելու

նպատակով համարվում է, որ ΔP կորուստը ներկայացվում է P_f բեռի կազմում, իսկ էլեկտրակայաններից մեկը հավասարակշռող է, և նրա P_h հզորությունը որոշվում է հետևյալ արտահայտությամբ.

$$P_h = P_f - (P_1 + P_2 + \dots + P_n) : \quad (12)$$

Էներգահամակարգի՝ նվազեցման ենթակա ծախսերը կարելի է ներկայացնել հետևյալ կերպ.

$$\bar{O} = \bar{O}_1 + \dots + \bar{O}_i + \dots + \bar{O}_n + \bar{O}_h : \quad (13)$$

Ըստ որում՝ հաշվեկշռող էլեկտրակայանի վրա $\bar{O}_h$ ծախսերը ֆունկցիա են մյուս բոլոր էլեկտրակայանների $P_1, P_2, \dots, P_n$ հզորություններից, այսինքն՝

$$\bar{O}_h = \bar{O}_h [P_h(P_1, P_2, \dots, P_n)] \quad (14)$$

բարդ ֆունկցիա է P_i հզորությունից:

(13) ֆունկցիայի էքստրեմումը գտնելու համար անհրաժեշտ է $\bar{O}$ ծախսի մասնակի ածանցյալներն ըստ n անկախ փոփոխականների հավասարեցնել զրոյի՝

$$d\bar{O}/dP_i = 0, \quad i = 1, \dots, n : \quad (15)$$

Դիֆերենցելով (13) – ը և հաշվի առնելով (14) – ը, կստանանք.

$$d\bar{O}_i/dP_i + (d\bar{O}_h/dP_h) (dP_h/dP_i) = 0 : \quad (16)$$

Հաշվի առնելով, որ հաշվեկշռող էլեկտրակայանի ծախսը ֆունկցիա է P_h փոփոխականից (որը կարելի է հաշվել (12) արտահայտությամբ) և ներդնելով՝ դրամական ծախսերի հարաբերական աճ՝ հասկացությունը՝

$$\delta_i = d\bar{O}_i / dP_i, \quad (17)$$

(16) արտահայտությունը կարելի է ներկայացնել հետևյալ տեսքով.

$$\delta_i + \delta_h (dP_h / dP_i) = 0, \quad i = 1, \dots, n : \quad (18)$$

Դիֆերենցելով (12) – ը և տեղադրելով $dP_h / dP_i = -1$ արժեքը, կստանանք՝

$$\delta_i + \delta_h (-1) = 0, \quad i = 1, \dots, n : \quad (19)$$

Այս հավասարությունները թույլ են տալիս ձևակերպել հետևյալ սկզբունքը. Էներգահամակարգի էլեկտրակայանների միջև բեռի բաշխման լավագույն տարբերակին համապատասխանում է այդ էլեկտրակայաններից առաքվող էլեկտրաէներգիայի վրա դրամական ծախսերի հարաբերական աճերի հավասարության պայմանը՝

$$\delta_1 = \delta_2 = \dots = \delta_n = \delta_h : \quad (20)$$

Ներկայացված (20) բեռի լավագույն բաշխման պայմանը լավարկման չափորոշիչ է, սակայն անմիջականորեն չի սահմանում, թե ինչպիսին պետք է լինի յուրաքանչյուր էլեկտրակայանի հզորությունը: Բայց և այնպես, կիրառելով (20) պայմանը, հնարավոր է կատարել բեռի լավագույն բաշխում: Ըստ որում՝ խնդիրը կարելի է լուծել երկու եղանակով՝ գրաֆիկական և վերլուծական:

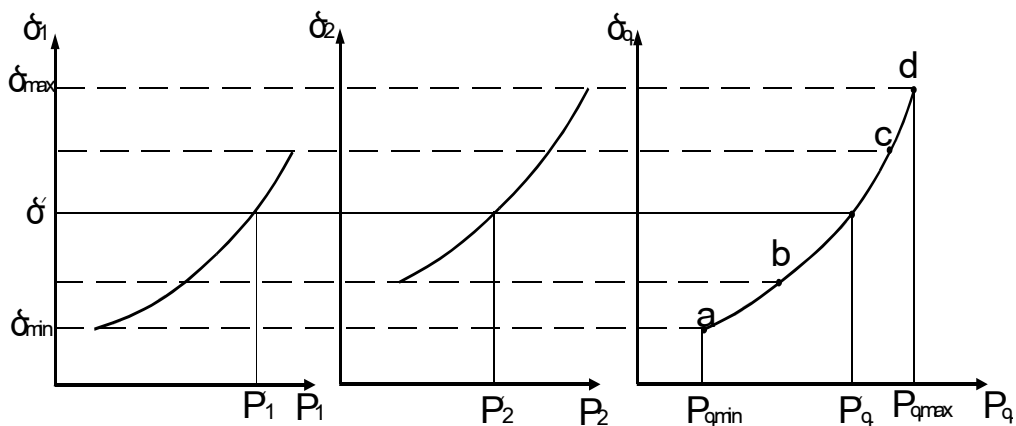
Գրաֆիկական լուծումը հիմնվում է Էներգահամակարգի համար գումարային $\delta_q = f(P_q)$ գրաֆիկի կառուցման վրա: Ելակետային տվյալներ ընդունվում են յուրաքանչյուր էլեկտրակայանի համար կառուցված ծախսերի հարաբերական աճերի $\delta_i = f(P_i)$ գրաֆիկները:

Ընդունում ենք որոշ δ' հարաբերական աճի արժեք և որոշում ենք դրան համապատասխանող $P'_1, \dots, P'_n, P'_h$ հզորության արժեքները: Այդ հզորության արժեքների գումարը կազմում է Էներգահամակարգի գումարային P'_q հզորությունը, որի համար ծախսի հարաբերական աճը կազմում է δ' , իսկ հզորությունների P'_i արժեքները համապատասխանում են հզորության լավագույն բաշխմանը: Կառու-

ցումները կրկնելով ծախսի հարաբերական աճի տարբեր արժեքների համար, կստանանք $\delta_q = f(P_q)$ գումարային գրաֆիկը (նկարում ներկայացված է այդպիսի կառուցումը երկու էլեկտրակայաններից կազմված համակարգի համար):

Էներգահամակարգի նվազագույն ($P_{q \min}$) և առավելագույն ($P_{q \max}$) հզորությունները որոշվում են էլեկտրակայանների նվազագույն և առավելագույն հզորությունների գումարով:

Ըստ նկարի, եթե էներգահամակարգն աշխատում է ծախսերի նվազագույն հարաբերական աճի արժեքով, ապա երկու էլեկտրակայաններն էլ ունեն նվազագույն հզորություն: Բաշխման ենթակա P_q բեռի աճի դեպքում նախ պետք է բեռնվի առաջին էլեկտրակայանը, իսկ երկրորդը՝ շարունակի աշխատել նվազագույն բեռով: ab տեղամասը կրկնում է $\delta_1(P_1)$ բնութագրի սկզբնամասը, համանման ձևով cd տեղամասը կրկնում է $\delta_2(P_2)$ բնութագրի համապատասխան վերջնամասը:



Նկ. Ծախսերի հարաբերական աճերի բնութագրերը

Այս կերպ կառուցված գումարային բնութագիրը համապատասխանում է սարքավորումների որոշակի կազմի: Սարքավորման կազմի փոփոխությունը հանգեցնում է գրաֆիկի տեսքի և նրա $P_{q \min}$, $P_{q \max}$ սահմանների փոփոխությանը: Այդ պատճառով, բեռի շահավետ բաշխումը համապատասխանում է նախապես ընտրված կազմին և պետք է վերանայվի դրա փոփոխման դեպքում: Սարքավորման կազմի ընտրությունը կատարվում է՝ ելնելով ժամանակի ընթացքում բեռի փոփոխման բնույթից:

Վերլուծական եղանակի դեպքում $\bar{\sigma}_i = f(P_i)$ ծախսային բնութագիրը հիմնականում բավարար ճշտությամբ կարելի է ներկայացնել

$$\bar{\sigma}_i = a_i P_i^2 + b_i P_i + c_i \quad (21)$$

երկրորդ աստիճանի բազմանդամի տեսքով, որի դիֆերենցումից ստացվում է դրամական ծախսերի հարաբերական աճի վերլուծական արտահայտությունը՝

$$\delta_i = 2a_i P_i + b_i : \quad (22)$$

Հավասարումների (19) համակարգը և հաշվեկշռային (12) հավասարումը համատեղ ղիտարկելով, կստանանք՝

$$2a_1 P_1 + 0 + \dots - 2a_h P_h = b_h - b_1 ,$$

$$2a_2 P_2 + 0 + \dots - 2a_h P_h = b_h - b_2 ,$$

$$2a_n P_n - 2a_h P_h = b_h - b_n ,$$

$$P_1 + P_2 + P_3 + \dots + P_n + P_h = P_p :$$

Եթե ստացված համակարգում առաջին n հավասարումները բաժանվեն անկյունագծային $2a_i$ գործակիցների վրա, ապա մատրիցի տեսքով կստանանք՝

$$\begin{bmatrix} 1 & & & & & \alpha_1 \\ & 1 & & & & \alpha_2 \\ & & 1 & & & \alpha_3 \\ & & & \dots & & \dots \\ & & & & 1 & \alpha_{n-1} \\ & & & & & 1 & \alpha_n \\ 1 & 1 & 1 & \dots & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ \dots \\ P_{n-1} \\ P_n \\ P_h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \beta_3 \\ \dots \\ \beta_{n-1} \\ \beta_n \\ P_p \end{bmatrix} , \quad (23)$$

որտեղ $\alpha_i = a_h / a_i$, $\beta_i = (b_h - b_i) / 2a_i$:

Լուծելով (23) գծային հանրահաշվական հավասարումների համակարգը P_i հզորությունների նկատմամբ, գտնում ենք բեռի լավագույն բաշխումը էլեկտրակայանների միջև էներգահամակարգի տրված P_p բեռի դեպքում: Ստացված հավասարումների համակարգի լուծումը հնարավոր է ուղիղ մեթոդներով (օրինակ՝ Գաուսի կամ քառակուսի արմատի) :

Որոշված P_i^0 արժեքները կարող են չբավարարել (7) սահմանափակմանը՝ ըստ ակտիվ հզորության: Այդ պատճառով, հաշվարկի ալգորիթմում պետք է նախատեսել դրանց հզորության փոխարինում $P_{i \min}$ կամ $P_{i \max}$ արժեքներով: Եթե կրկնակի հաշվարկման դեպքում բոլոր սահմանափակումները կատարվում են, ապա ստացված P_i^0 հզորության արժեքները համապատասխանում են շահավետ բաշխմանը:

ՀՀ էներգահամակարգի առանձնահատկությունը (բեռի բաշխման լավարկման տեսակետից) այն է, որ, մի կողմից, առկա են տարբեր տիպի էներգակիրներով աշխատող էլեկտրակայաններ, հատկապես սահմանափակ ջրի պաշար ունեցող ՀԷԿ-եր, իսկ մյուս կողմից, էլեկտրակայանների թիվը համեմատաբար մեծ չէ, ինչը հնարավոր է դարձնում լավարկման խնդրի լուծումը:

Նշված առանձնահատկություններից ելնելով՝ նպատակահարմար է լավարկումը կատարել հետևյալ հաջորդականությամբ.

ա) կատարել աշխատող սարքավորման կազմի հեռանկարային պլանավորում՝ ելնելով սպասվող բեռից, ՀԷԿ-երի ակնկալվող ջրային ռեսուրսներից, ԱԷԿ-ի հզորությունից և ՋԷԿ-երում «պտտվող պաշարի» նպատակահարմար մեծությունից,

բ) կատարել սահմանափակ ջրի պաշար ունեցող ՀԷԿ-երի հզորության գրաֆիկի պլանավորում՝ էներգահամակարգի առավելագույն բեռի ժամանակահատվածներում դրանք բեռնավորելու նպատակով,

գ) էլեկտրակայանների միջև բեռի բաշխման լավարկում վերը ներկայացված գրաֆիկական կամ վերլուծական եղանակով, որպես ելակետ ընդունելով ա)-ի

հիման վրա ընտրված աշխատող սարքավորման կազմը և բ)-ի հիման վրա որոշված սահմանափակ ջրի պաշար ունեցող ՀԷԿ-երի հզորությունը:

ա) և բ) կետերի կատարումը լուծում է այն խնդիրները, որոնք լավարկման ժամանակահատվածի լավագույն հզորությունը կախման մեջ են դնում էներգահամակարգի հետագա ռեժիմներից:

ա)-ի կատարման ժամանակ ոչ միանշանակ լուծում կարող է տրվել ՋԷԿ-երում $\square$ պտտվող պաշարի $\square$ և, համապատասխանաբար, աշխատող սարքավորման կազմի պահպանմանը՝ բեռի անկման ժամանակահատվածներում: Եթե այդ դեպքում հնարավոր է որևէ գեներատորի անջատումը, ապա դրա նպատակահարմարությունը կարելի է որոշել՝ նրա հետագա գործարկման համար պահանջվող վառելիքի ծախսը համեմատելով վառելիքի այն խնայողության հետ, որը կստացվի մյուս գեներատորների բեռնավորման և նրանց առաքած էլեկտրաէներգիայի վրա վառելիքի տեսակարար ծախսի փոքրացման հաշվին: Օրինակ, եթե 200 ՄՎտ հզորության երեք էներգաբլոկներից մեկը հնարավոր է կանգնեցնել, ապա երկարատև կանգառից հետո այն գործարկելու համար ծախսվում է 75 տ պայմանական վառելիք, իսկ մյուս երկու էներգաբլոկների լրացուցիչ բեռնավորման շնորհիվ նրանց առաքած էլեկտրաէներգիայի վրա պայմանական վառելիքի տեսակարար ծախսը կնվազի 27 գ/կՎտ.ժ-ով, ինչը կբերի ժամում մոտ 8 տ պայմանական վառելիքի տնտեսման: Այս դեպքում, եթե բեռի անկման ժամանակահատվածը 9,4 ժ ավելի է, ապա շահավետ է էներգաբլոկի կանգնեցումը:

բ) կետի կատարման անհրաժեշտությունը պայմանավորված է նրանով, որ, եթե ջրի սահմանափակ պաշար ունեցող ՀԷԿ-ի հզորությունը նրա պաշարի վերականգնման ժամանակահատվածի համար չպլանավորվի, ապա ՀԷԿ-ը, ունենալով համեմատաբար փոքր ծախս, ըստ բեռի բաշխման լավարկման ծրագրի կբեռնավորվի առավելագույն չափով և ժամանակից շուտ կսպառի ջրի պաշարը:

բ) կետով նախատեսված լավարկման գործողությունը պետք է կատարել նաև ԱԷԿ-ի բեռի գրաֆիկի մշակման համար այն դեպքերում, երբ միջուկային վառելիքը չի բավարարելու մինչև պլանավորվող վերալիցքավորման ժամկետը առավելագույն հզորությամբ աշխատելու համար:

գ) կետով նախատեսված լավարկումը կատարելու համար անհրաժեշտ է յուրաքանչյուր էլեկտրակայանի համար մշակել P_i հզորությունից կախում ունեցող դրամական ծախսերի $\bar{O}_i(P_i)$ բաղադրիչն արտահայտող ֆունկցիան տվյալ էլեկտրակայանի աշխատող սարքավորումների տարբեր կազմերի համար: $\bar{O}_i(P_i)$ բաղադրիչում հիմնականում ընդգրկվում են էներգակրի, ջրամշակման համար օգտագործվող նյութերի և բնապահպանական հատկացումների ծախսերը: Բնապահպանական ծախսերը, էներգակրի ծախսից հետո, էլեկտրակայանի հզորությունից կախված առավել զգալի ծախսերն են: Ըստ որում՝ տարբեր էլեկտրակայաններում այդ ծախսերը զգալիորեն տարբերվում են միմյանցից, ինչը կարող է իր ազդեցությունն ունենալ բեռի բաշխման վրա: Օրինակ, Երևանի ՋԷԿ-ի լրացուցիչ բեռնավորման դեպքում աճում են ջրահովարաններում ջրի կորստի և ծխագազերի արտանետման հետ կապված բնապահպանական վճարները, Հրազդանի ՋԷԿ-ի էներգաբլոկների բեռնավորման դեպքում՝ ծխագազերի արտանետման հետ կապված վճարները (ջրի կորստի հետ կապված ծախսերը չեն

աճում, քանի որ կիրառվում են ‘չոր’ տիպի ջրահովարաններ), ԱԷԿ-ի բեռնավորման դեպքում՝ միայն ջրի կորստի հետ կապված բնապահպանական ծախսերը:

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. **Арзамасцев Д.А., Бартоломей П.И., Холян А.М.** АСУ и оптимизация режимов энергосистем. – М.: Высш. шк., 1983.-208 с.
2. **Веников В.А., Журавлев В.Г., Филиппова Т.А.** Оптимизация режимов электростанций и энергосистем. –М.: Энергоиздат,1990.-352 с.
3. Эффективность природоохранных мероприятий / Под ред. **Т.С. Хачатурова, К. В. Папенова.** -М.: Изд.-во МГУ, 1990.- 224 с.
4. Մարուխյան Ռ.Զ. Շրջակա միջավայրի պաշտպանությունը ՋԷԿ-երի և ԱԷԿ-երի արտանետումներից: Ուսումնական ձեռնարկ: Մաս I: Հայաստանի պետական ճարտարագիտական համալսարան: Եր.: Ճարտարագետ, 2002. - 116 էջ:
5. Մարուխյան Ռ.Զ., Բուռնաչյան Հ.Ա. ՋԷԿ-երի աշխատանքի ռեժիմները և շահագործումը: Ուսումնական ձեռնարկ: Հայաստանի պետական ճարտարագիտական համալսարան: Եր.: Ճարտարագետ, 1994. - 144 էջ:

ՀՊՃՀ: Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 10.12.2003:

В.З. МАРУХЯН, Т.С. ТАТИКЯН

ОПТИМИЗАЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ МЕЖДУ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯМИ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ РА

Рассмотрена задача распределения электрической нагрузки энергосистемы между электростанциями, потребляющими различные энергоресурсы. Условием оптимальности распределения нагрузки предложено считать достижение минимальных денежных затрат. К числу затрат, зависящих от распределения нагрузки, отнесены стоимость энергоносителей, стоимость химических реагентов и затраты, связанные с охраной окружающей среды. Оптимальное распределение нагрузки найдено дифференцированием уравнений переменных затрат электростанций по мощности электростанций. Сформулировано условие оптимального распределения нагрузки.

V.Z. MARUKHYAN, T.S. TATIKYAN

OPTIMIZATION OF ELECTRICAL LOAD DISTRIBUTION BETWEEN POWER PLANTS OF POWER SYSTEM RA

The problem of electrical load distribution in power systems between power plants consuming various energy resources is considered. The condition of optimality in load distribution is proposed to reckon the achievement of minimum cash expenditures. The cost of energy carriers, the cost of chemical reagents and expenditures connected with environment control refer to expenditures depending on load distribution. The optimum load distribution is obtained by differentiating equations of power plant expenditure variables according to the power of the power plant. Optimum load distribution condition is formed.

В.С. ХАЧАТРЯН, К.В. ХАЧАТРЯН

КОРРЕКЦИЯ Y-Z ДИАКОПТИЧЕСКОЙ МАТРИЦЫ ЭЭС ПРИ ПРЕВРАЩЕНИИ СТАНЦИОННЫХ УЗЛОВ ТИПА P-U В НАГРУЗОЧНЫЕ УЗЛЫ

Предлагается метод коррекции диакоптической Y-Z расчетной матрицы при превращении станционных узлов типа P-U в нагрузочные, обеспечивающий высокую маневренность при решении Y-Z формы уравнения установившегося режима большой ЭЭС и требующий минимального объема вычислительных работ.

Ключевые слова: матрица, станция, система, объем, узел, режим, нагрузка.

Широкое применение гибридной Y-Z матрицы для построения нелинейных алгебраических уравнений установившегося режима электроэнергетической системы (ЭЭС) требует обеспечения ее высокой маневренности при изменении исходной информации относительно активных режимных параметров [1-5].

Одним из важных подходов к решению указанной задачи является применение идеи диакоптики, что приводит к резкому понижению не только требуемого объема памяти, но и объема вычислительных работ [6,7].

Представляя заданную ЭЭС, состоящую из (M+1) узлов, в виде совокупности радиально связанных N подсистем, получим

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{i_1} \\ \dot{I}_{i_2} \\ \dots \\ \dot{I}_{i_N} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{i_1 j_1} & & & \\ & Y_{i_2 j_2} & & \\ \dots & \dots & \ddots & \dots \\ & & & Y_{i_N j_N} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_{j_1} \\ \dot{U}_{j_2} \\ \dots \\ \dot{U}_{j_N} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где $\dot{I}_i = (\dot{I}_{i_1}, \dot{I}_{i_2}, \dots, \dot{I}_{i_N})$, $\dot{U}_j = (\dot{U}_{j_1}, \dot{U}_{j_2}, \dots, \dot{U}_{j_N})$ - многомерные векторы комплексных токов и напряжений радиально связанных подсистем; $Y_{ij} = (Y_{i_1 j_1}, Y_{i_2 j_2}, \dots, Y_{i_N j_N})$ - неособенные квадратные подматрицы узловых комплексных проводимостей тех же подсистем.

Для дальнейшего изложения материала принимается следующая дополнительная система индексов:

- для станционных узлов:

$$m(n) = m_1(n_1), m_2(n_2), \dots, m_N(n_N); \quad (2)$$

- для нагрузочных узлов:

$$k(\ell) = k_1(\ell_1), k_2(\ell_2), \dots, k_N(\ell_N). \quad (3)$$

При этом

$$i(j) = m(n), (k, \ell). \quad (4)$$

Систему индексов для отдельных подсистем можно представить в виде

$$\begin{aligned} i_1(j_1) &= m_1(n_1), k_1(\ell_1), \\ i_2(j_2) &= m_2(n_2), k_2(\ell_2), \\ &\dots\dots\dots \\ i_N(j_N) &= m_N(n_N), k_N(\ell_N). \end{aligned} \quad (5)$$

С учетом (5) подматричное уравнение первой подсистемы из (1) можно представить в виде

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_{m_1} \\ \dot{i}_{\ell_1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{m_1 n_1} & Y_{m_1 k_1} \\ Y_{\ell_1 n_1} & Y_{\ell_1 k_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_{n_1} \\ \dot{U}_{k_1} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

После определенного преобразования матричное уравнение (6) принимает вид

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_{m_1} \\ \dot{U}_{k_1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{m_1 n_1} & \dot{A}_{m_1 \ell_1} \\ \dot{B}_{k_1 n_1} & Z_{k_1 \ell_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_{n_1} \\ \dot{i}_{\ell_1} \end{bmatrix}, \quad (7)$$

где

$$\begin{aligned} Y_{m_1, n_1} &= Y_{m_1 n_1} - Y_{m_1 k_1} Z_{k_1 \ell_1} Y_{\ell_1 n_1}, \\ \dot{A}_{m_1, \ell_1} &= Y_{m_1 k_1} \cdot Z_{k_1 \ell_1}, \\ \dot{B}_{k_1, n_1} &= Z_{k_1 \ell_1} \cdot Y_{\ell_1 n_1}, \\ Z_{k_1, \ell_1} &= Z_{\ell_1, k_1}. \end{aligned} \quad (8)$$

Для второй подсистемы можем написать

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_{m_2} \\ \dot{U}_{k_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{m_2 n_2} & \dot{A}_{m_2 \ell_2} \\ \dot{B}_{k_2 n_2} & Z_{k_2 \ell_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_{n_2} \\ \dot{i}_{\ell_2} \end{bmatrix}, \quad (9)$$

где

$$\begin{aligned} Y_{m_2, n_2} &= Y_{m_2 n_2} - Y_{m_2 k_2} Z_{k_2 \ell_2} Y_{\ell_2 n_2}, \\ \dot{A}_{m_2, \ell_2} &= Y_{m_2 k_2} \cdot Z_{k_2 \ell_2}, \\ \dot{B}_{k_2, n_2} &= Z_{k_2 \ell_2} \cdot Y_{\ell_2 n_2}, \\ Z_{k_2, \ell_2} &= Z_{\ell_2, k_2}. \end{aligned} \quad (10)$$

Аналогичным образом можем написать для остальных и N-й подсистем:

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_{m_N} \\ \dot{U}_{k_N} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{m_N n_N} & \dot{A}_{m_N \ell_N} \\ \dot{B}_{k_N n_N} & Z_{k_N \ell_N} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_{n_N} \\ \dot{i}_{\ell_N} \end{bmatrix}, \quad (11)$$

где

$$\begin{aligned}
Y_{m_N, n_N} &= Y_{m_N n_N} - Y_{m_N k_N} Z_{k_N \ell_N} Y_{\ell_N n_N}, \\
\dot{A}_{m_N, \ell_N} &= Y_{m_N k_N} Z_{k_N \ell_N}, \\
\dot{B}_{k_N, n_N} &= -Z_{k_N \ell_N} Y_{\ell_N n_N}, \\
Z_{k_N, \ell_N} &= Z_{\ell_N, k_N}.
\end{aligned} \tag{12}$$

Представим Y-Z диакоптическую матрицу в виде

$$\begin{array}{c}
\begin{array}{|c|c|} \hline Y_{\Gamma_1, \Gamma_1} & \dot{A}_{\Gamma_1, H_1} \\ \hline \dot{B}_{H_1, \Gamma_1} & Z_{H_1, H_1} \\ \hline \end{array} \\
\begin{array}{|c|c|} \hline Y_{\Gamma_2, \Gamma_2} & \dot{A}_{\Gamma_2, H_2} \\ \hline \dot{B}_{H_2, \Gamma_2} & Z_{H_2, H_2} \\ \hline \end{array} \\
\ddots \\
\begin{array}{|c|c|} \hline Y_{\Gamma_N, \Gamma_N} & \dot{A}_{\Gamma_N, H_N} \\ \hline \dot{B}_{H_N, \Gamma_N} & Z_{H_N, H_N} \\ \hline \end{array}
\end{array} \tag{13}$$

Предположим, в первой подсистеме один из обобщенных узлов типа P-U превращается в узел типа P-Q, т.е. становится нагрузочным. В результате порядок подматрицы Y_{m_1, n_1} уменьшается на единицу, а порядок подматрицы Z_{k_1, ℓ_1} увеличивается на единицу. При этом число узлов первой подсистемы не меняется.

Пусть номер нового нагрузочного узла типа P-Q совпадает с последним номером узлов с индексами $m_1(n_1)$, при котором соответствующая квадратная матрица принимает вид

$$Y_1 - Z_1 = \left[\begin{array}{c|c} Y_{\Gamma_1-1, \Gamma_1-1} & \dot{A}_{\Gamma_1-1, H_1+1} \\ \hline \dot{B}_{H_1+1, \Gamma_1-1} & Z_{H_1+1, H_1+1} \end{array} \right]. \tag{14}$$

Можно заметить, что если порядок квадратной матрицы Y_{Γ_1, Γ_1} уменьшается на единицу, то порядок квадратной матрицы Z_{H_1, H_1} увеличивается на единицу.

Теперь необходимо установить численные значения новой матрицы Z_{H_1+1, H_1+1} (14), когда известна матрица Z_{H_1, H_1} , приведенная в (13).

Суть задачи заключается в том, что при построении искомой матрицы Z_{H_1+1, H_1+1} необходимо использовать известную матрицу Z_{H_1, H_1} , не изменяя ее структуры.

Представим структуру исходной неособенной квадратной матрицы порядка $N+1$, с помощью которой необходимо построить искомую матрицу Z_{H_1+1, H_1+1} :

$$\left[\begin{array}{c|cccc} Y_{\Gamma_1 \Gamma_1} & Y_{\Gamma_1, \Gamma_1+1} & Y_{\Gamma_1, \Gamma_1+2} & \cdots & Y_{\Gamma_1, \Gamma_1+H_1} \\ Y_{\Gamma_1+1, \Gamma_1} & & & & \\ Y_{\Gamma_1+2, \Gamma_1} & & & & \\ \dots\dots\dots & & & & \\ Y_{\Gamma_1+H_1, \Gamma_1} & & & & \end{array} \right] \cdot \quad (15)$$

Можно заметить, что квадратная матрица $[Y]_{H_1, H_1}$, приведенная в (15), имеющая порядок H_1 , совпадает с порядком матрицы Z_{H_1, H_1} , приведенной в (13).

Теперь необходимо установить матрицу Z_{H_1+1, H_1+1} с использованием известной матрицы, приведенной в (13).

Представим матрицу (15) в следующем виде:

$$Y_{H_1+1, H_1+1} = \left[\begin{array}{c|c} Y_{\Gamma_1 \Gamma_1} & Y_{\Gamma_1 H_1} \\ Y_{H_1 \Gamma_1} & Y_{H_1 H_1} \end{array} \right]. \quad (16)$$

В блочной матрице (16) приняты обозначения:

$$Y_{\Gamma_1 H_1} = [Y_{\Gamma_1, \Gamma_1+1} \quad Y_{\Gamma_1, \Gamma_1+2} \quad \cdots \quad Y_{\Gamma_1, \Gamma_1+H_1}], \quad (17)$$

$$Y_{H_1 \Gamma_1}^T = [Y_{\Gamma_1+1, \Gamma_1} \quad Y_{\Gamma_1+2, \Gamma_1} \quad \cdots \quad Y_{\Gamma_1+H_1, \Gamma_1}]^T, \quad (18)$$

где T - знак транспонирования.

Искомую матрицу Z_{H_1+1, H_1+1} представим в той же структуре, что и исходную матрицу (16):

$$Z_{H_1+1, H_1+1} = \left[\begin{array}{c|c} \dot{T}_{\Gamma_1 \Gamma_1} & \dot{T}_{\Gamma_1 H_1} \\ \dot{T}_{H_1 \Gamma_1} & \dot{T}_{H_1 H_1} \end{array} \right]. \quad (19)$$

При этом между блочными матрицами существует зависимость

$$\left[\begin{array}{c|c} Y_{\Gamma_1 \Gamma_1} & Y_{\Gamma_1 H_1} \\ Y_{H_1 \Gamma_1} & Y_{H_1 H_1} \end{array} \right] \times \left[\begin{array}{c|c} \dot{T}_{\Gamma_1 \Gamma_1} & \dot{T}_{\Gamma_1 H_1} \\ \dot{T}_{H_1 \Gamma_1} & \dot{T}_{H_1 H_1} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c|c} 1 & 0 \\ 0 & E \end{array} \right], \quad (20)$$

где 1 и E являются единичными матрицами.

Полученная система (20) является блочно-матричной, в которой известными являются блоки $Y_{\Gamma_1 \Gamma_1}$, $Y_{\Gamma_1 H_1}$, $Y_{H_1 \Gamma_1}$, $Y_{H_1 H_1}$ а искомыми - $\dot{T}_{\Gamma_1 \Gamma_1}$, $\dot{T}_{\Gamma_1 H_1}$, $\dot{T}_{H_1 \Gamma_1}$, $\dot{T}_{H_1 H_1}$. Пользуясь методом исключения неизвестных блоков, можно установить следующие их выражения:

$$\dot{T}_{\Gamma_1\Gamma_1} = \frac{1}{Y_{\Gamma_1\Gamma} - Y_{\Gamma\Gamma} Y_{\text{HH}}^{-1} Y_{\text{H}\Gamma}}, \quad (21)$$

$$\dot{T}_{\text{H}_1\Gamma_1} = -Y_{\text{H}_1\text{H}}^{-1} Y_{\text{H}\Gamma} \dot{T}_{\Gamma\Gamma}, \quad (22)$$

$$\dot{T}_{\Gamma_1\text{H}_1} = -Y_{\text{H}_1\Gamma} Y_{\text{HH}}^{-1} \dot{T}_{\Gamma\Gamma}, \quad (23)$$

$$\dot{T}_{\text{H}_1\text{H}_1} = Y_{\text{H}_1\text{H}}^{-1} + Y_{\text{HH}}^{-1} Y_{\text{H}\Gamma} Y_{\Gamma\text{H}} Y_{\text{HH}}^{-1} \dot{T}_{\Gamma\Gamma}. \quad (24)$$

Учитывая, что $Y_{\text{H}_1\text{H}_1}^{-1} = Z_{\text{H}_1\text{H}_1}$, искомая неособенная квадратная матрица (20) принимает следующий окончательный вид:

$$Z_{\text{H}_1+1, \text{H}_1+1} = \left[\begin{array}{c|c} (Y_{\Gamma\Gamma} - Y_{\Gamma\text{H}} Z_{\text{HH}} Y_{\text{H}\Gamma})^{-1} & -Y_{\Gamma\text{H}} Z_{\text{HH}} \dot{T}_{\Gamma\Gamma} \\ \hline -Z_{\text{HH}} Y_{\text{H}\Gamma} \dot{T}_{\Gamma\Gamma} & Z_{\text{HH}} + Z_{\text{HH}} Y_{\text{H}\Gamma} Y_{\Gamma\text{H}} Z_{\text{HH}} \dot{T}_{\Gamma\Gamma} \end{array} \right]. \quad (25)$$

Из структуры полученной матрицы (25) можно заметить, что в ней действительно фигурирует известная матрица $Z_{\text{H}_1\text{H}_1}$, приведенная в расчетной диакоптической матрице Y-Z (13).

В полученной матрице (25) верхний левый блок является одним числом, верхний правый блок - строчной матрицей порядка $1 \times \text{H}_1$, нижний правый блок - столбцовой матрицей порядка $\text{H}_1 \times 1$, а нижний правый блок - квадратной матрицей порядка H_1 .

В отличие от классического подхода, предложенный новый метод не требует обращения какой-либо матрицы.

После установления численных значений элементов подматрицы $Z_{\text{H}_1+1, \text{H}_1+1}$ нетрудно построить искомую Y-Z₁ расчетную матрицу, которая будет иметь структуру, приведенную в виде (14).

Для определения подматриц $Y_{\Gamma-1, \Gamma-1}$; $\dot{A}_{\Gamma-1, \text{H}+1}$; $\dot{B}_{\text{H}+1, \Gamma-1}$ необходимо воспользоваться формулами

$$Y_{\Gamma-1, \Gamma-1} = Y_{(\Gamma-1)(\Gamma-1)} - Y_{(\Gamma-1)(\text{H}+1)} Z_{(\text{H}+1)(\text{H}+1)} Y_{(\text{H}+1)(\Gamma-1)}, \quad (26)$$

$$\dot{A}_{\Gamma-1, \text{H}+1} = Y_{(\Gamma-1)(\text{H}+1)} Z_{(\text{H}+1)(\text{H}+1)}, \quad (27)$$

$$\dot{B}_{\text{H}+1, \Gamma-1} = -Z_{(\text{H}+1)(\text{H}+1)} Z_{(\text{H}+1)(\Gamma-1)}. \quad (28)$$

После установления структуры искомой матрицы первой подсистемы можно уточнить структуру кибернетической матрицы (13) для осуществления расчета установившегося режима. Аналогичное явление получается при структурном изменении других подсистем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Хачатрян В.С., Этмекчян Э.А.** Развитие гибридного метода расчета установившегося режима электрической системы // Электричество .- 1991.- № 1.-С. 6-13.
2. **Хачатрян В.С., Аль-Дарвиш М.Б.** Решение Y-Z формы уравнений установившегося режима электроэнергетической системы с применением матрицы Гессе // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН.-1997.-Т. 50, № 3.- С.194-203.
3. **Хачатрян К. В.** Расчет установившегося режима ЭЭС при P-U типе станционных узлов // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН.-2000.-Т. 53, № 1.- С. 39-43.
4. **Хачатрян В. С., Бадалян Н. П., Хачатрян К. В., Маргарян К. К.** Расчет установившегося режима электроэнергетической системы, когда станционные узлы типа P-U превращаются в нагрузочные узлы типа P-Q// Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН.-2002.- Т 54, № 1.- С. 52-57.
5. **Хачатрян В. С., Бадалян Н. П., Хачатрян К. В., Маргарян К. К.** Метод коррекции Y-Z расчетной матрицы электроэнергетической системы // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН.-2001.-Т. 54, № 1.- С. 41-46.
6. **Хачатрян В. С., Бадалян Н. П.** Решение (Y-Z)-уравнений установившегося режима электроэнергетической системы методом декомпозиции // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН.-1997.-Т. 50, № 2.-С. 96-103.
7. **Хачатрян В.С., Этмекчян Э.А., Бадалян Н.П.** Решение гибридных уравнений установившегося режима электроэнергетической системы методом диакоптики // Электричество .- 1999.- № 4.-С.7-12.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 20.12.2002.

Վ.Ս. ԽԱՉԱՏՐՅԱՆ, Կ.Վ. ԽԱՉԱՏՐՅԱՆ
ԷԷՀ-Ի Y-Z ԴԻԱԿՈՊՏԻԿԱԿԱՆ ՄԱՏՐԻՑԻ ՃՇԳՐՏՈՒՄԸ
P-U ՏԵՍՔԻ ԿԱՅԱՆԱՑԻՆ ՀԱՆԳՈՒՅՑՆԵՐԸ ԲԵՌՆԱՑԻՆ ՀԱՆԳՈՒՅՑՆԵՐՈՎ
ՓՈԽԱՐԽՆԵԼՈՒ ԴԵՊՔՈՒՄ

Առաջարկվում է Y-Z դիակոպտիկական մատրիցի ճշգրտման մեթոդ P-U տեսքի կայանային հանգույցները բեռնային հանգույցներով փոխարինելու դեպքում: Մեթոդն ապահովում է մեծ մանրայնություն ԷԷՀ-ի կայունացված ռեժիմի Y-Z տեսքի հավասարումների լուծման ժամանակ և պահանջում նվազագույն հաշվողական աշխատանք:

V.S. KHACHATRYAN, K.V. KHACHATRYAN
Y-Z DIACOPTIC MATRIX CORRECTION OF ELECTRIC POWER SYSTEMS IN
TRANSFORMING STATION UNITS OF P-U TYPE INTO LOADING CENTRES

A method of Y-Z design diacoptic matrix correction where station units of P-U type are transformed into loading centres is proposed. This method provides high manoeuvrability in solving Y-Z form equations in steady – state electric power systems and requires the minimum volume of computations.

М.А. МНАЦАКАНЯН

РАСЧЕТ ДОПУСТИМОГО УСТАНОВИВШЕГОСЯ РЕЖИМА ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ МЕТОДОМ ДИАКОПТИКИ

Предлагается новый метод расчета допустимого установившегося режима электроэнергетической системы с применением идеи диакоптики. С обеспечением допустимости установившегося режима отдельных подсистем обеспечивается допустимость установившегося режима для ЭЭС в целом.

Ключевые слова: подсистема, модель, узел, матрица, режим, система, параметр, функция, мощность, сеть, станция, нагрузка, аргумент.

При решении задач расчета оптимального режима электроэнергетической системы (ЭЭС) важное значение имеет вопрос определения дооптимального допустимого установившегося режима.

В настоящее время существует ряд методов расчета допустимого установившегося режима ЭЭС [1-4]. Если работа [1] посвящена расчету допустимого установившегося режима при Z-форме задания состояния сети, то [2] - при Y - форме. В [3] рассматривается упрощенный метод расчета допустимого установившегося режима, основанный на Z эквивалентированной ЭЭС. В отличие от вышеотмеченных работ, в [4] предлагается метод расчета допустимого установившегося режима ЭЭС при Y-Z форме задания состояния сети.

В данной работе впервые предлагается метод расчета допустимого установившегося режима, основанный на идее диакоптики.

В настоящее время самым перспективным направлением для решения любых режимных вопросов большой ЭЭС является идея декомпозиции, которая представляется как совокупность радиально связанных отдельных подсистем.

Постановка задачи. Рассматривается схема замещения большой ЭЭС, состоящая из $M+1$ узлов и N электрически связанных подсистем. Отдельные подсистемы, состоящие соответственно из $M_1, M_2, \dots, M_N$ независимых узлов ($M_1 + M_2 + \dots + M_N = M$), связаны между собой $L_{12} + 1, L_{23} + 1, \dots, L_{(N-1)N} + 1$ ветвями.

Для всех электрически связанных подсистем выбирается единственный базисный (по напряжению) и балансирующий (по мощностям) станционный узел, в результате чего рассматриваемая схема замещения исследуемой ЭЭС будет состоять из M независимых узлов.

Выбирается следующая система индексов:

для стационарных узлов типа P-U:

$$m, n = (m_1, n_1; m_2, n_2; \dots; m_N, n_N); \quad (1)$$

для нагрузочных узлов типа P-Q:

$$k, \ell = (k_1, \ell_1; k_2, \ell_2; \dots; k_N, \ell_N); \quad (2)$$

для произвольных узлов, в состав которых могут входить как стационарные, так и нагрузочные узлы:

$$i, j = (i_1, j_1; i_2, j_2; \dots; i_N, j_N). \quad (3)$$

Подындексы $1, 2, \dots, N$ характеризуют номера подсистем схемы замещения.

В связи с выбранной системой индексов узловые режимные параметры большой схемы замещения можно представить как совокупность режимных параметров отдельных подсистем:

$$P_{i(j)} = (P_{i_1(j_1)}; P_{i_2(j_2)}; \dots; P_{i_N(j_N)}), \quad (4)$$

$$Q_{i(j)} = (Q_{i_1(j_1)}; Q_{i_2(j_2)}; \dots; Q_{i_N(j_N)}), \quad (5)$$

$$U_{i(j)} = (U_{i_1(j_1)}; U_{i_2(j_2)}; \dots; U_{i_N(j_N)}), \quad (6)$$

$$\Psi_{ui(j)} = (\Psi_{ui_1(j_1)}; \Psi_{ui_2(j_2)}; \dots; \Psi_{ui_N(j_N)}). \quad (7)$$

После удаления межсистемных связывающих ветвей $L = L_{12} + L_{23} + \dots + L_{(N-1)N}$ отдельные подсистемы представляются как совокупность единственно связывающих ветвей подсистем.

Решение задачи. Если для исходной схемы замещения ЭЭС уравнение состояния в матричной форме необходимо представить в виде

$$\dot{U}_i = \dot{U}_B + Z_{ij} \dot{I}_j, \quad (8)$$

то для радиально связанных подсистем как совокупность матричных уравнений отдельных подсистем:

$$\begin{cases} \dot{U}_{i_1} = \dot{U}_{B_{i_1}} + Z_{i_1 j_1} \dot{I}_{j_1}, \\ \dot{U}_{i_2} = \dot{U}_{B_{i_2}} + Z_{i_2 j_2} \dot{I}_{j_2}, \\ \dots\dots\dots \\ \dot{U}_{i_N} = \dot{U}_{B_{i_N}} + Z_{i_N j_N} \dot{I}_{j_N}, \end{cases} \quad (9)$$

где величины $\dot{U}_{B_{i_1}}, \dot{U}_{B_{i_2}}, \dots, \dot{U}_{B_{i_N}}$ учитывают структуру удаленных ветвей, связывающих радиально связанные отдельные подсистемы, и определяются с помощью следующих выражений:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{B_{i_1}} &= \dot{U}_B + Z_{i_1 M_1} \Delta \dot{I}_{1,N} + \Delta Z_{i_1 S_1} \dot{I}_\gamma, \\ \dot{U}_{B_{i_2}} &= \dot{U}_{M_1} + Z_{i_2 M_2} \Delta \dot{I}_{2,N} + \Delta Z_{i_2 S_2} \dot{I}_\gamma, \\ &\dots\dots\dots \\ \dot{U}_{B_{i_N}} &= \dot{U}_{M_{1,N-1}} + Z_{i_N M_N} \Delta \dot{I}_{N,N} + \Delta Z_{i_N S_N} \dot{I}_\gamma. \end{aligned} \quad (10)$$

Можно заметить, что в выражение $\dot{U}_{Bi_1}$ входит напряжение единственного базисного узла $\dot{U}_B$.

Умножая отдельные строки (9) соответственно на $\hat{I}_{i_1}, \hat{I}_{i_2}, \dots, \hat{I}_{i_N}$, т.е. на комплексно-сопряженные токи, и разлагая их на действительные и мнимые составляющие, можно установить уравнения активных и реактивных мощностей отдельных подсистем:

$$\begin{cases} P_{i_1} = P_{Bi_1} + \sum_{j_1}^{M_1} (R_{i_1 j_1} A_{i_1 j_1} + X_{i_1 j_1} B_{i_1 j_1}), \\ Q_{i_1} = Q_{Bi_1} + \sum_{j_1}^{M_1} (X_{i_1 j_1} A_{i_1 j_1} - R_{i_1 j_1} B_{i_1 j_1}); \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} P_{i_2} = P_{Bi_2} + \sum_{j_2}^{M_1} (R_{i_2 j_2} A_{i_2 j_2} + X_{i_2 j_2} B_{i_2 j_2}), \\ Q_{i_2} = Q_{Bi_2} + \sum_{j_2}^{M_1} (X_{i_2 j_2} A_{i_2 j_2} - R_{i_2 j_2} B_{i_2 j_2}); \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} P_{i_N} = P_{Bi_N} + \sum_{j_N}^{M_1} (R_{i_N j_N} A_{i_N j_N} + X_{i_N j_N} B_{i_N j_N}), \\ Q_{i_N} = Q_{Bi_N} + \sum_{j_N}^{M_1} (X_{i_N j_N} A_{i_N j_N} - R_{i_N j_N} B_{i_N j_N}), \end{cases} \quad (13)$$

где

$$A_{i_1 j_1} = \frac{1}{U_{i_1} U_{j_1}} [(P_{i_1} P_{j_1} + Q_{i_1} Q_{j_1}) \cos(\Psi_{ui_1} - \Psi_{uj_1}) + (Q_{i_1} P_{j_1} - P_{i_1} Q_{j_1}) \sin(\Psi_{ui_1} - \Psi_{uj_1})], \quad (14)$$

$$B_{i_1 j_1} = \frac{1}{U_{i_1} U_{j_1}} [(P_{i_1} P_{j_1} + Q_{i_1} Q_{j_1}) \sin(\Psi_{ui_1} - \Psi_{uj_1}) - (Q_{i_1} P_{j_1} - P_{i_1} Q_{j_1}) \cos(\Psi_{ui_1} - \Psi_{uj_1})];$$

$$A_{i_2 j_2} = \frac{1}{U_{i_2} U_{j_2}} [(P_{i_2} P_{j_2} + Q_{i_2} Q_{j_2}) \cos(\Psi_{ui_2} - \Psi_{uj_2}) + (Q_{i_2} P_{j_2} - P_{i_2} Q_{j_2}) \sin(\Psi_{ui_2} - \Psi_{uj_2})], \quad (15)$$

$$B_{i_2 j_2} = \frac{1}{U_{i_2} U_{j_2}} [(P_{i_2} P_{j_2} + Q_{i_2} Q_{j_2}) \sin(\Psi_{ui_2} - \Psi_{uj_2}) - (Q_{i_2} P_{j_2} - P_{i_2} Q_{j_2}) \cos(\Psi_{ui_2} - \Psi_{uj_2})];$$

$$\begin{aligned}
& \dots\dots\dots \\
A_{i_N j_N} &= \frac{1}{U_{i_N} U_{j_N}} \left[(P_{i_N} P_{j_N} + Q_{i_N} Q_{j_N}) \cos(\Psi_{ui_N} - \Psi_{uj_N}) + \right. \\
& \quad \left. + (Q_{i_N} P_{j_N} - P_{i_N} Q_{j_N}) \sin(\Psi_{ui_N} - \Psi_{uj_N}) \right], \\
B_{i_N j_N} &= \frac{1}{U_{i_N} U_{j_N}} \left[(P_{i_N} P_{j_N} + Q_{i_N} Q_{j_N}) \sin(\Psi_{ui_N} - \Psi_{uj_N}) - \right. \\
& \quad \left. - (Q_{i_N} P_{j_N} - P_{i_N} Q_{j_N}) \cos(\Psi_{ui_N} - \Psi_{uj_N}) \right].
\end{aligned} \tag{16}$$

С другой стороны,

$$\begin{aligned}
P_{B1} &= \frac{U_{Bi}}{U_{i_1}} (P_{i_1} \cos \Psi_{ui_1} + Q_{i_1} \sin \Psi_{ui_1}), \\
Q_{B1} &= -\frac{U_{Bi}}{U_{i_1}} (P_{i_1} \sin \Psi_{ui_1} - Q_{i_1} \cos \Psi_{ui_1});
\end{aligned} \tag{17}$$

$$\begin{aligned}
P_{B2} &= \frac{U_{Bi}}{U_{i_2}} (P_{i_2} \cos \Psi_{ui_2} + Q_{i_2} \sin \Psi_{ui_2}), \\
Q_{B2} &= -\frac{U_{Bi}}{U_{i_2}} (P_{i_2} \sin \Psi_{ui_2} - Q_{i_2} \cos \Psi_{ui_2});
\end{aligned} \tag{18}$$

$$\begin{aligned}
& \dots\dots\dots \\
P_{BN} &= \frac{U_{Bi}}{U_{i_N}} (P_{i_N} \cos \Psi_{ui_N} + Q_{i_N} \sin \Psi_{ui_N}), \\
Q_{BN} &= -\frac{U_{Bi}}{U_{i_N}} (P_{i_N} \sin \Psi_{ui_N} - Q_{i_N} \cos \Psi_{ui_N}).
\end{aligned} \tag{19}$$

С учетом выбранной системы индексов вышеприведенные системы уравнений (11)-(13) в неявновыраженных формах можно представить в следующем виде:

$$\Phi_{m_1}(P, Q, U, \Psi_u) = \begin{cases} \Phi_{pm_1}(P, Q, U, \Psi_u), \\ \Phi_{qm_1}(P, Q, U, \Psi_u); \end{cases} \tag{20}$$

$$\Phi_{k_1}(P, Q, U, \Psi_u) = \begin{cases} \Phi_{pk_1}(P, Q, U, \Psi_u), \\ \Phi_{qk_1}(P, Q, U, \Psi_u); \end{cases} \tag{21}$$

$$\Phi_{m_2}(P, Q, U, \Psi_u) = \begin{cases} \Phi_{pm_2}(P, Q, U, \Psi_u), \\ \Phi_{qm_2}(P, Q, U, \Psi_u); \end{cases} \tag{22}$$

$$\Phi_{k_2}(P, Q, U, \Psi_u) = \begin{cases} \Phi_{pk_2}(P, Q, U, \Psi_u), \\ \Phi_{qk_2}(P, Q, U, \Psi_u); \end{cases} \quad (23)$$

$$\Phi_{m_N}(P, Q, U, \Psi_u) = \begin{cases} \Phi_{pm_N}(P, Q, U, \Psi_u), \\ \Phi_{qm_N}(P, Q, U, \Psi_u); \end{cases} \quad (24)$$

$$\Phi_{k_N}(P, Q, U, \Psi_u) = \begin{cases} \Phi_{pk_N}(P, Q, U, \Psi_u), \\ \Phi_{qk_N}(P, Q, U, \Psi_u). \end{cases} \quad (25)$$

В результате диакоптическую математическую модель допустимого установившегося режима ЭЭС можно представить в виде

$$\begin{cases} \Phi_{m_1}(P, Q, U, \Psi_u) = 0, \\ \Phi_{k_1}(P, Q, U, \Psi_u) = 0, \\ U_{m_1, \min} \leq U_{m_1} \leq U_{m_1, \max}, \\ Q_{m_1, \min} \leq Q_{m_1} \leq Q_{m_1, \max}; \end{cases} \quad (26)$$

$$\begin{cases} \Phi_{m_2}(P, Q, U, \Psi_u) = 0, \\ \Phi_{k_2}(P, Q, U, \Psi_u) = 0, \\ U_{m_2, \min} \leq U_{m_2} \leq U_{m_2, \max}, \\ Q_{m_2, \min} \leq Q_{m_2} \leq Q_{m_2, \max}; \end{cases} \quad (27)$$

$$\begin{cases} \Phi_{m_N}(P, Q, U, \Psi_u) = 0, \\ \Phi_{k_N}(P, Q, U, \Psi_u) = 0, \\ U_{m_N, \min} \leq U_{m_N} \leq U_{m_N, \max}, \\ Q_{m_N, \min} \leq Q_{m_N} \leq Q_{m_N, \max}. \end{cases} \quad (28)$$

Из приведенной математической модели (26)-(28) можно заметить, что ограничения налагаются на реактивные мощности и модули напряжений станционных узлов как сверху (max), так и снизу (min).

Предположим, что независимые станционные узлы являются узлами типа P-Q, тогда искомыми режимными параметрами будут модули и аргументы комплексных напряжений. Рассмотрим математическую подмодель допустимого установившегося режима первой подсистемы, относительно искомым режимных параметров которых на основании метода Ньютона-Рафсона можно написать следующее рекуррентное выражение:

$$\begin{bmatrix} \Psi_{um_1} \\ \Psi_{uk_1} \\ U_{m_1} \\ U_{k_1} \end{bmatrix}^{И+1} = \begin{bmatrix} \Psi_{um_1} \\ \Psi_{uk_1} \\ U_{m_1} \\ U_{k_1} \end{bmatrix}^{И} - \begin{bmatrix} \Delta\Psi_{um_1} \\ \Delta\Psi_{uk_1} \\ \Delta U_{m_1} \\ \Delta U_{k_1} \end{bmatrix}, \quad (29)$$

где И - номер итерации.

Столбцевая матрица приращений выражения (29) определяется на основании матричного выражения

$$\begin{bmatrix} \Delta P_{m_1} \\ \Delta P_{k_1} \\ \Delta Q_{m_1} \\ \Delta Q_{k_1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \Phi_{pm_1}}{\partial \Psi_{un_1}} & \frac{\partial \Phi_{pm_1}}{\partial \Psi_{u\ell_1}} & \frac{\partial \Phi_{pm_1}}{\partial U_{n_1}} & \frac{\partial \Phi_{pm_1}}{\partial U_{\ell_1}} \\ \frac{\partial \Phi_{pk_1}}{\partial \Psi_{un_1}} & \frac{\partial \Phi_{pk_1}}{\partial \Psi_{u\ell_1}} & \frac{\partial \Phi_{pk_1}}{\partial U_{n_1}} & \frac{\partial \Phi_{pk_1}}{\partial U_{\ell_1}} \\ \frac{\partial \Phi_{qm_1}}{\partial \Psi_{un_1}} & \frac{\partial \Phi_{qm_1}}{\partial \Psi_{u\ell_1}} & \frac{\partial \Phi_{qm_1}}{\partial U_{n_1}} & \frac{\partial \Phi_{qm_1}}{\partial U_{\ell_1}} \\ \frac{\partial \Phi_{qk_1}}{\partial \Psi_{un_1}} & \frac{\partial \Phi_{qk_1}}{\partial \Psi_{u\ell_1}} & \frac{\partial \Phi_{qk_1}}{\partial U_{n_1}} & \frac{\partial \Phi_{qk_1}}{\partial U_{\ell_1}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta\Psi_{um_1} \\ \Delta\Psi_{uk_1} \\ \Delta U_{m_1} \\ \Delta U_{k_1} \end{bmatrix}, \quad (30)$$

где ΔP_{m_1} , ΔQ_{m_1} , ΔP_{k_1} , ΔQ_{k_1} - приращения соответствующих режимных параметров независимых станционных узлов первой подсистемы.

Частные производные, входящие в матрицу Якоби, определяются с помощью аналитических выражений Φ_{pm_1} и Φ_{pk_1} , приведенных в (20).

Из матричного уравнения (30) искомый столбец приращений режимных параметров определяется в виде

$$\begin{bmatrix} \Delta\Psi_{um_1} \\ \Delta\Psi_{uk_1} \\ \Delta U_{m_1} \\ \Delta U_{k_1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \Phi_{pm_1}}{\partial \Psi_{un_1}} & \frac{\partial \Phi_{pm_1}}{\partial \Psi_{u\ell_1}} & \frac{\partial \Phi_{pm_1}}{\partial U_{n_1}} & \frac{\partial \Phi_{pm_1}}{\partial U_{\ell_1}} \\ \frac{\partial \Phi_{pk_1}}{\partial \Psi_{un_1}} & \frac{\partial \Phi_{pk_1}}{\partial \Psi_{u\ell_1}} & \frac{\partial \Phi_{pk_1}}{\partial U_{n_1}} & \frac{\partial \Phi_{pk_1}}{\partial U_{\ell_1}} \\ \frac{\partial \Phi_{qm_1}}{\partial \Psi_{un_1}} & \frac{\partial \Phi_{qm_1}}{\partial \Psi_{u\ell_1}} & \frac{\partial \Phi_{qm_1}}{\partial U_{n_1}} & \frac{\partial \Phi_{qm_1}}{\partial U_{\ell_1}} \\ \frac{\partial \Phi_{qk_1}}{\partial \Psi_{un_1}} & \frac{\partial \Phi_{qk_1}}{\partial \Psi_{u\ell_1}} & \frac{\partial \Phi_{qk_1}}{\partial U_{n_1}} & \frac{\partial \Phi_{qk_1}}{\partial U_{\ell_1}} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \Delta P_{m_1} \\ \Delta P_{k_1} \\ \Delta Q_{m_1} \\ \Delta Q_{k_1} \end{bmatrix}. \quad (31)$$

После обращения неособенной квадратной матрицы выражения (31) получим

$$\begin{bmatrix} \Delta\Psi_{um_1} \\ \Delta\Psi_{uk_1} \\ \Delta U_{m_1} \\ \Delta U_{k_1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{m_1 n_1} & a_{m_1 \ell_1} & b_{m_1 n_1} & b_{m_1 \ell_1} \\ a_{k_1 n_1} & a_{k_1 \ell_1} & b_{k_1 n_1} & b_{k_1 \ell_1} \\ c_{m_1 n_1} & c_{m_1 \ell_1} & d_{m_1 n_1} & d_{m_1 \ell_1} \\ c_{k_1 n_1} & c_{k_1 \ell_1} & d_{k_1 n_1} & d_{k_1 \ell_1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta P_{m_1} \\ \Delta P_{k_1} \\ \Delta Q_{m_1} \\ \Delta Q_{k_1} \end{bmatrix}, \quad (32)$$

где a , b , c и d - элементы обращенной матрицы.

Представим матричное уравнение (32) в виде

$$\begin{bmatrix} \Delta\Psi_{um_1} \\ \Delta\Psi_{uk_1} \\ \Delta U_{k_1} \\ \Delta U_{m_1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{m_1 n_1} & a_{m_1 \ell_1} & b_{m_1 n_1} & b_{m_1 \ell_1} \\ a_{k_1 n_1} & a_{k_1 \ell_1} & b_{k_1 n_1} & b_{k_1 \ell_1} \\ c_{k_1 \ell_1} & c_{k_1 n_1} & d_{k_1 \ell_1} & d_{k_1 n_1} \\ c_{m_1 \ell_1} & c_{m_1 n_1} & d_{m_1 \ell_1} & d_{m_1 n_1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta P_{m_1} \\ \Delta P_{k_1} \\ \Delta Q_{k_1} \\ \Delta Q_{m_1} \end{bmatrix}. \quad (33)$$

Предположим, что независимые станционные узлы являются узлами P-U, т.е. зафиксированы модули комплексных напряжений:

$$\Delta U_{m_1} = 0. \quad (34)$$

Тогда матричное уравнение (33) принимает вид

$$\begin{bmatrix} \Delta\Psi_{um_1} \\ \Delta\Psi_{uk_1} \\ \Delta U_{k_1} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{m_1 n_1} & a_{m_1 \ell_1} & b_{m_1 n_1} & b_{m_1 \ell_1} \\ a_{k_1 n_1} & a_{k_1 \ell_1} & b_{k_1 n_1} & b_{k_1 \ell_1} \\ c_{k_1 \ell_1} & c_{k_1 n_1} & d_{k_1 \ell_1} & d_{k_1 n_1} \\ c_{m_1 \ell_1} & c_{m_1 n_1} & d_{m_1 \ell_1} & d_{m_1 n_1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta P_{m_1} \\ \Delta P_{k_1} \\ \Delta Q_{k_1} \\ \Delta Q_{m_1} \end{bmatrix}. \quad (35)$$

На основании (35) можно написать следующие подматричные выражения:

$$\begin{bmatrix} \Delta\Psi_{um_1} \\ \Delta\Psi_{uk_1} \\ \Delta U_{k_1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{m_1 n_1} & a_{m_1 \ell_1} & b_{m_1 n_1} & b_{m_1 \ell_1} \\ a_{k_1 n_1} & a_{k_1 \ell_1} & b_{k_1 n_1} & b_{k_1 \ell_1} \\ c_{k_1 \ell_1} & c_{k_1 n_1} & d_{k_1 \ell_1} & d_{k_1 n_1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta P_{m_1} \\ \Delta P_{k_1} \\ \Delta Q_{k_1} \\ \Delta Q_{m_1} \end{bmatrix}, \quad (36)$$

$$0 = \begin{bmatrix} c_{m_1 n_1} & c_{m_1 \ell_1} & d_{m_1 \ell_1} & d_{m_1 n_1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta P_{m_1} \\ \Delta P_{k_1} \\ \Delta Q_{k_1} \\ \Delta Q_{m_1} \end{bmatrix}. \quad (37)$$

Представляя матричное выражение (37) в строчной форме:

$$0 = [c_{m_1 n_1}] \cdot [\Delta P_{m_1}] + [c_{m_1 \ell_1}] \cdot [\Delta P_{k_1}] + [d_{m_1 \ell_1}] \cdot [\Delta Q_{k_1}] + [d_{m_1 n_1}] \cdot [\Delta Q_{m_1}], \quad (38)$$

можно установить следующее выражение для вектора реактивных мощностей

независимых стационарных узлов:

$$[\Delta Q_{m_1}] = -[d_{m_1 n_1}]^{-1} \cdot [D_{n_1 \ell_1}], \quad (39)$$

где

$$[D_{n_1 \ell_1}] = [c_{m_1 n_1}] \cdot [\Delta P_{m_1}] + [c_{m_1 \ell_1}] \cdot [\Delta P_{k_1}] + [d_{m_1 \ell_1}] \cdot [\Delta Q_{k_1}]. \quad (40)$$

Матричное выражение (39) позволяет установить численные значения реактивных мощностей независимых стационарных узлов первой подсистемы, пользуясь выражением Φ_{k_1} , приведенным в математической модели (26).

После получения значений реактивных мощностей проверяется условие

$$Q_{m_1, \min} \leq Q_{m_1} \leq Q_{m_1, \max}, \quad (41)$$

при котором могут возникнуть следующие случаи.

1. Условие (41) полностью обеспечивается, что позволяет продолжить расчет установившегося режима. На основании (36) вычисляются численные значения приращений $\Delta \Psi_{um_1}$, $\Delta \Psi_{uk_1}$ и ΔU_{k_1} , затем определяется

$$\begin{bmatrix} \Psi_{um_1} \\ \Psi_{uk_1} \\ U_{k_1} \end{bmatrix}^{I+1} = \begin{bmatrix} \Psi_{um_1} \\ \Psi_{uk_1} \\ U_{k_1} \end{bmatrix}^I - \begin{bmatrix} \Delta \Psi_{um_1} \\ \Delta \Psi_{uk_1} \\ \Delta U_{k_1} \end{bmatrix}, \quad (42)$$

чем и завершается первая итерация.

2. Условие (41) обеспечивается частично. При этом возможно, что реактивные мощности независимых стационарных узлов с индексом m_1 могут быть больше или меньше предела. Тогда стационарный узел типа $P_{m_1} - U_{m_1}$ представляется в первом случае как $P_{m_1} - Q_{m_1, \max}$, а во втором случае - $P_{m_1} - Q_{m_1, \min}$. Разумеется, что при этом искомыми переменными являются модули и аргументы комплексных напряжений соответствующих узлов. Проверяется условие

$$U_{m_1, \min} \leq U_{m_1} \leq U_{m_1, \max}. \quad (43)$$

При нарушении условия (43) из стационарных узлов типа $P_{m_1} - U_{m_1}$ переходим к стационарным узлам типа $P_{m_1} - Q_{m_1}$ и т.д.

Осуществляя первую итерацию по первой подсистеме, определяем численные значения комплексных напряжений всех узлов и, следовательно, узла M_1 , т.е. $\dot{U}_{m_1}$. Имея численные значения $\dot{U}_{m_1}$, устанавливаем по (10) численные значения $\dot{U}_{Bi_2}$ и формируем математическую модель допустимого установившегося режима второй подсистемы, т.е. (27). Осуществляя реализацию математической модели допустимого установившегося режима второй подсистемы, устанавливаем

численные значения комплексных напряжений всех узлов и, следовательно, узла M_2 и формируем математическую модель третьей подсистемы и т.д. Осуществляя реализацию математической модели допустимого установившегося режима предпоследней подсистемы, устанавливаем численное значение $\dot{U}_{Bi_N}$ последней подсистемы и формируем математическую модель допустимого установившегося режима N-й подсистемы, т.е. (28).

На основании метода Ньютона-Рафсона устанавливаем следующее рекуррентное выражение:

$$\begin{bmatrix} \frac{\Psi_{um_N}}{\Psi_{uk_N}} \\ \frac{U_{k_N}}{U_{k_N}} \end{bmatrix}^{I+1} = \begin{bmatrix} \frac{\Psi_{um_N}}{\Psi_{uk_N}} \\ \frac{U_{k_N}}{U_{k_N}} \end{bmatrix}^I - \begin{bmatrix} \frac{\Delta\Psi_{um_N}}{\Delta\Psi_{uk_N}} \\ \frac{\Delta U_{k_N}}{\Delta U_{k_N}} \end{bmatrix}, \quad (44)$$

где

$$\begin{bmatrix} \frac{\Delta\Psi_{um_N}}{\Delta\Psi_{uk_N}} \\ \frac{\Delta U_{k_N}}{\Delta U_{m_N}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{a_{m_N n_N}}{a_{k_N n_N}} & \frac{a_{m_N \ell_N}}{a_{k_N \ell_N}} & \frac{b_{m_N n_N}}{b_{k_N n_N}} & \frac{b_{m_N \ell_N}}{b_{k_N \ell_N}} \\ \frac{c_{k_N \ell_N}}{c_{m_N \ell_N}} & \frac{c_{k_N n_N}}{c_{m_N n_N}} & \frac{d_{k_N \ell_N}}{d_{m_N \ell_N}} & \frac{d_{k_N n_N}}{d_{m_N n_N}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{\Delta P_{m_N}}{\Delta P_{k_N}} \\ \frac{\Delta Q_{k_N}}{\Delta Q_{m_N}} \end{bmatrix}. \quad (45)$$

Предположим, что все стационарные узлы N-й подсистемы являются узлами типа P-U, тогда:

$$\begin{bmatrix} \frac{\Delta\Psi_{um_N}}{\Delta\Psi_{uk_N}} \\ \frac{\Delta U_{k_N}}{\Delta U_{k_N}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{a_{m_N n_N}}{a_{k_N n_N}} & \frac{a_{m_N \ell_N}}{a_{k_N \ell_N}} & \frac{b_{m_N n_N}}{b_{k_N n_N}} & \frac{b_{m_N \ell_N}}{b_{k_N \ell_N}} \\ \frac{c_{k_N \ell_N}}{c_{k_N \ell_N}} & \frac{c_{k_N n_N}}{c_{k_N n_N}} & \frac{d_{k_N \ell_N}}{d_{k_N \ell_N}} & \frac{d_{k_N n_N}}{d_{k_N n_N}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{\Delta P_{m_N}}{\Delta P_{k_N}} \\ \frac{\Delta Q_{k_N}}{\Delta Q_{m_N}} \end{bmatrix} \quad (46)$$

и

$$[\Delta Q_{m_N}] = -[d_{m_N n_N}]^{-1} \cdot [D_{n_N \ell_N}], \quad (47)$$

где

$$[D_{n_N \ell_N}] = [c_{m_N n_N}] \cdot [\Delta P_{m_N}] + [c_{m_N \ell_N}] \cdot [\Delta P_{k_N}] + [d_{m_N \ell_N}] \cdot [\Delta Q_{k_N}]. \quad (48)$$

Устанавливая на основании (47) численные значения реактивных мощностей независимых стационарных узлов N-й подсистемы, проверяем условие

$$Q_{m_N, \min} \leq Q_{m_N} \leq Q_{m_N, \max}. \quad (49)$$

Если данное условие обеспечивается, то остальные режимные параметры определяются на основании рекуррентного выражения

$$\begin{bmatrix} \frac{\Psi_{um_N}}{\Psi_{uk_N}} \\ \frac{U_{k_N}}{U_{k_N}} \end{bmatrix}^{I+1} = \begin{bmatrix} \frac{\Psi_{um_N}}{\Psi_{uk_N}} \\ \frac{U_{k_N}}{U_{k_N}} \end{bmatrix}^I - \begin{bmatrix} \frac{\Delta\Psi_{um_N}}{\Delta\Psi_{uk_N}} \\ \frac{\Delta U_{k_N}}{\Delta U_{k_N}} \end{bmatrix}. \quad (50)$$

Если условие (49) не обеспечивается, то переходим к узлам типа P-Q до установления численных значений необходимых режимных параметров.

Завершая первые итерационные процессы по отдельным подсистемам, получаем полную картину режимных параметров для ЭЭС в целом, что является особенностью предложенного нового метода.

Итерационный процесс по расчету допустимого установившегося режима для ЭЭС считается завершенным, если при соблюдении условий

$$U_{m_i, \min} \leq U_{m_i} \leq U_{m_i, \max}, \quad (51)$$

$$Q_{m_i, \min} \leq Q_{m_i} \leq Q_{m_i, \max} \quad (52)$$

обеспечиваются также условия сходимости:

$$|P_i - [P_{Bi} - \Phi_{pi}(P, Q, U, \Psi_u)]| \leq \Delta P_i, \quad (53)$$

$$|Q_i - [Q_{Bi} - \Phi_{qi}(P, Q, U, \Psi_u)]| \leq \Delta Q_i, \quad (54)$$

где $i = 1, 2, 3, \dots, N$.

Для некоторого упрощения итерационного процесса принимается, что

$$\Delta P_{i_1} = \Delta P_{i_2} = \Delta P_{i_3} = \dots = \Delta P_{i_2} = \Delta P, \quad (55)$$

$$\Delta Q_{i_1} = \Delta Q_{i_2} = \Delta Q_{i_3} = \dots = \Delta Q_{i_2} = \Delta Q, \quad (56)$$

где ΔP и ΔQ - выбранные нами положительные величины, характеризующие точность получения численных значений искомых режимных параметров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Хачатрян В.С., Аль-Исса Ибрахим, Хачатрян К.В.** Метод определения допустимого установившегося режима ЭЭС // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН.-1998.-Т. 51, № 3.- С.295-300.
2. **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, № 1.- С.43-50.
3. **Хачатрян К.В., Нашат А.А., Мкртчян Г.С.** Расчет допустимого установившегося режима Z эквивалентированной электроэнергетической системы // Моделирование, оптимизация, управление: Сб. науч. тр.- Ереван.-2000.- Вып. 3.- С.103-108.
4. **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, № 3.- С. 417-425.
5. **Хачатрян В.С., Бадалян Н.П.** Расчет установившегося режима большой электроэнергетической системы методом диакоптики // Электричество.-2003.-№ 6.- С.13-17.
6. **Хачатрян В.С., Этмекчян Э.А., Бадалян Н.П.** Решение гибридных уравнений установившегося режима электроэнергетической системы методом диакоптики // Электричество .- 1999.- № 4.-С.7-12.
7. **Хачатрян В.С., Бадалян Н.П., Мнацаканян М.А.** Коррекция Y-Z диакоптической матрицы при изменении структуры исходной электроэнергетической системы // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН.-2003.- Т. 56, № 3.- С. 411-416.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 10.10.2003.

Մ.Ա. ՄՆԱՑԱԿԱՆՅԱՆ

**ԷԼԵԿՏՐԱԷՆԵՐԳԵՏԻԿԱԿԱՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳԻ ԹՈՒՅԼԱՏՐԵԼԻ ԿԱՅՈՒՆԱՑՎԱԾ
ՌԵԺԻՄԻ ՀԱՇՎԱՐԿԸ ԴԻԱԿՈՊՏԻԿԱԿԱՆ ՄԵԹՈԴՈՎ**

Առաջարկվում է էլեկտրաէներգետիկական համակարգի թույլատրելի կայունացված ռեժիմի հաշվարկի դիսկոպտիկական նոր մեթոդ: Լրիվ էլեկտրաէներգետիկական համակարգի համար ապահովվում է թույլատրելի կայունացված ռեժիմ՝ առանձին ենթահամակարգերի կայունացված ռեժիմների թույլատրելիության ապահովմամբ:

M.A. MNATSAKANYAN

**CALCULATION FOR PERMISSIBLE STEADY-STATE CONDITIONS IN
ELECTRIC POWER SYSTEMS BY THE DIACOPTIC METHOD**

A new method of calculation for permissible steady-state conditions in the electric power system using a diacoptic idea is proposed. By providing permissibility in steady-state conditions of separate subsystems the permissibility in steady-state condition as a whole is provided for electric power plants.

В.Г. ПЕТРОСЯН

КОМПЛЕКС АЛГОРИТМОВ ИНТЕГРАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА И ДИАГНОСТИКИ АЭС С ВВЭР- 440

Изложены основы построения интегральной системы мониторинга и диагностики (ИСМО) оборудования АЭС с ВВЭР-440. Приведена алгоритмическая структура системы, состоящей из трех основных модулей. С точки зрения комплексной диагностики, показана целесообразность интеграции отдельных модулей, учитывая при этом опыт их эксплуатации на энергоблоке №2 Армянской АЭС.

Ключевые слова: протечка, диагностирование, вибрация оборудования, локализация, мониторинг, идентификация.

1. Обоснование создания ИСМД. В настоящее время явно намечается направление по созданию интегральных систем диагностики оборудования АЭС, которое считается перспективным. В частности, во всемирно известной фирме «Вестингауз» создана интегральная система диагностики «ALLY», которая внедрена во многих странах. Во ВНИИАЭС разработана система виброшумовой диагностики с широким назначением, а именно, выявление аномальных вибрационных состояний оборудования реакторной установки (РУ), вызванных изменением условий закрепления оборудования, изменением его жесткостных характеристик или возрастанием гидродинамических нагрузок со стороны потока теплоносителя. При этом объектом диагностирования является главный циркуляционный контур РУ типа водо-водяного энергетического реактора (ВВЭР), включая реактор с внутрикорпусными устройствами, главные циркуляционные насосы, парогенераторы, опоры и элементы крепления компонентов первого контура.

Мониторинг за вибрационными характеристиками сложных конструкций способен выявить на ранней стадии появление механических дефектов или аномальное изменение условий закрепления элементов конструкций, т.е. появляется возможность диагностирования с выходом на причину той или иной аномалии.

Опыт эксплуатации систем контроля протечки теплоносителя (СКТТ), обнаружения свободных и слабозакрепленных предметов (СОССП) и контроля за вибрациями (СКВ) компонентов первого контура, установленных на энергоблоке №2 ААЭС, показал целесообразность и эффективность интеграции указанных систем с целью комплексного диагностирования и идентификации причин аномалий и возможных дефектов.

Например, в случае, когда СОССП регистрирует ударные явления, то параллельно с ней и СКТТ реагирует на это явление, несмотря на то, что частотные диапазоны сигналов разные. По информации обеих систем можно более точно установить причину и элемент, порождающий аномалию, используя при этом возможности локализации источника энергии и протечки. Для подтверждения этого факта были проведены специальные эксперименты, которые заключались в

следующем. Во время ППР-2002г. были нанесены тестовые удары по элементам первого контура. При этом, во-первых, ударные явления были зарегистрированы как СОССП, так и СКТТ; во-вторых, что не менее важно, по информации как СОССП, так и СКТТ были реализованы программы локализации, результаты которых были весьма близки.

Следует отметить, что аналогичная картина наблюдалась и при анализе и обработке информации СОССП и СКТТ на работающем блоке, что позволяет сделать заключение о том, что эффективность процесса диагностирования существенно повышается на основе информации, полученной параллельно из обеих систем.

Другим не менее важным фактором для комплексного диагностирования аномалий является совместное исследование и обработка информации СОССП и СВК, что позволяет установить тип и место ударного явления, (сосредоточенный удар или наоборот), стационарность (или нестационарность) источника энергии, изменение спектральных характеристик сигналов (изменение резонансов и амплитуд сигналов), а также выделить общеконтурные вибрации, идентифицировать резонансы, прогнозировать развитие аномалий и т.д.

Исходя из вышеизложенного и основываясь на опыте эксплуатации диагностических систем, установленных на энергоблоке №2 ААЭС, в Институте «Арматом» ведутся разработки по созданию ИСМД для АЭС с ВВЭР-440.

2. Структура математического обеспечения (МО) ИСМД. ИСМД включает в себя системы:

- контроля за протечками теплоносителя (СКТТ);
- контроля за вибрациями оборудования первого контура ВВЭР-440 (СВК);
- контроля за ударными явлениями (СКУЯ).

2.1. Структура МО СКТТ. МО СКТТ состоит из следующих блоков.

Блок 1. В этом блоке организована проверка факта фиксации протечки по превышению показаний датчиков в **dB** пороговые значения.

Блок 2. Этот блок предназначен для локализации протечки по сигналам датчиков. При этом предусмотрена коррекция значений сигналов датчиков.

Блок 3. В этом блоке по результатам функционирования блока 2 определяется расход протечки при заданном коэффициенте перевода сигналов в **dB** на расход протечки в $\text{м}^3/\text{с}$.

Результаты реализации блоков 2 и 3 выводятся на экран дисплея в виде графиков локализации расхода протечки. Алгоритмы локализации и расхода протечки, а также результаты численных экспериментов, проведенных на энергоблоке №2 ААЭС, изложены в [1-3].

2.2. Структура МО СВК. СВК предназначены для контроля за вибрациями оборудования первого контура (ГЦН, ПГ, ГЗЗ, ГЦТ, Ду200). МО СВК состоит из следующих блоков:

Блок 1. В этом блоке реализуется Фурье-преобразование (прямое), в результате чего выдаются спектральные характеристики зарегистрированных сигналов, т.е. осуществляется перевод временных реализаций сигналов в частотную область.

Блок 2. Этот блок по результатам реализации блока 1 формирует множество резонансных частот в диапазоне $0 \dots 100 \text{ Гц}$.

Блок 3. В этом блоке проводится оценка вибросостояния оборудования первого контура АЭС (ГЦН, ПГ, ГЗЗ, ГЦТ) с выдачей результатов в виде текстовой и графической информации в динамике (временные зависимости параметров оценки – виброускорение, виброскорость, виброперемещение) [4].

2.3. Структура МО СОССП. СОССП предназначена для обнаружения свободных и слабозакрепленных предметов в первом контуре энергоблока АЭС, МО которой состоит из следующих основных блоков:

Блок 1. Этот блок регистрирует сигналы датчиков СОССП, строит энергетические спектры (Фурье-преобразование), устанавливает резонансы при происшествиях.

Блок 2. Этот блок реализовывает алгоритмы локализации источника энергии и определения массы ударяющего предмета [5, 6].

Блок 3. Этот блок организует выходную информацию, содержащую результаты локализации, определения массы и идентификации происшествий в текстовом и графическом виде.

МО каждой из рассмотренных выше систем реализуется на одном автономно работающем РС компьютере, который включен в локальную вычислительную сеть и управляется главным РС компьютером, реализующим алгоритмы анализа состояния и комплексного диагностирования оборудования первого контура энергоблока АЭС с выходом на причину аномалий.

3. Комплексное диагностирование. При комплексном диагностировании реализуются следующие сценарии.

Первый сценарий. Допустим, что система СКТТ зарегистрировала аномальное явление, о чем выдала сообщение главному компьютеру. По этому сообщению главный компьютер запрашивает выходные информации из всех трех автономно работающих систем СКТТ, СКВ и СОССП. В главном компьютере анализируется поступившая текстовая и графическая информация по каждой системе, в результате чего устанавливаются количественные значения изменения контролируемых (основных) параметров по системам. При этом, если изменение параметров существенно (по заранее установленным критериям) только в системе СКТТ, то по местоположению протечки выносится решение о возможном дефекте и прогнозе развития в конкретном элементе первого контура, о чем выдается соответствующее сообщение, в том числе о продлении времени слежения за процессом.

В рассматриваемом сценарии случаи значительных изменений параметров, полученных из двух других систем, как правило, следует исключить.

В этом сценарии важным фактором является рассмотрение процесса изменения величины расхода протечки во времени, т.е. в динамике, благодаря которому может быть оценено развитие трещинной протечки и реализации концепции «Течь перед разрывом».

Второй сценарий. Допустим, что имело место ударное явление, о чем в главный компьютер передается сообщение из СОССП. В этом случае основной задачей является идентификация типа удара (чистый или наоборот). Установление

типа удара осуществляется по характеристике энергетического спектра сигналов СОССП. При чистом ударе, как правило, в спектре наблюдается один ярко выраженный пик, в противном случае - число пиков бывает больше одного, что является важным для выхода на причину аномалии наряду с локализацией источника энергии, установлением факта стационарности местоположения источника или подвижности и периодичности явления.

По результатам анализа локализации местоположения источника энергии, стационарности или подвижности местоположения, периодичности ударного явления, изменения структуры энергетического спектра можно установить необходимые данные и сформировать диагностические признаки, конкретный дефектный элемент с выходом на причины аномалий.

В рассматриваемом сценарии для комплексного диагностирования будет использована информация, полученная из СКТТ и СВК. Как было отмечено выше, на ударные явления, помимо СОССП, реагирует также СКТТ, следовательно, выходная информация СКТТ будет способствовать более точной идентификации события. Конкретно, информация СКТТ по локализации при рассмотренном сценарии будет весьма полезной для анализа процесса локализации источника энергии и решения задачи стационарности и периодичности ударного явления.

В ИСМД обеспечивается совместное использование информации СОССП и СВК при комплексном диагностировании, в частности, исследование когерентности, проведение взаимно-корреляционного и спектрального анализа сигналов СОСП и СВК, что позволит более наглядно установить диагноз и причины ударного явления.

В этом сценарии важным является оценка массы, так как причиной ударного явления является свободный предмет. Кроме того, совместное рассмотрение сигналов обеих систем дает возможность оценить вибрационное состояние дефектного элемента в динамике при ударном явлении.

Третий сценарий. В этом сценарии система СВК зарегистрировала аномальное явление, т.е. имело место превышение пороговых значений параметров (виброскорость и виброперемещение) оценки вибросостояния элементов первого контура по результатам обработки сигналов вибропреобразователей. Система СВК выдает необходимую для оценки информацию в текстовом и графическом виде для каждого канала и, следовательно, объекта, на котором установили вибропреобразователь. Следовательно, информация о локализации объекта, на котором произошли изменения, уже имеется.

Мониторинг за вибрационными характеристиками объекта диагностирования (ГЦН, ГЦТ, ПГ, ГЗЗ) позволяет выявить на ранней стадии появление механических дефектов, используя вибрационные характеристики (например, резонансы). Так как вибрационные характеристики (например, резонансные частоты) связаны с определенными параметрами конструкции, то появляется возможность диагностирования с выходом на причину.

Среди спектральных особенностей сигналов датчиков СВК и СОССП можно выделить следующие классы резонансов:

- собственные частоты вибраций элементов первого контура;

- резонансные частоты возбуждающих сил (например, частоты вращения ГЦН с нелинейными явлениями).

Каждая из этих характеристик служит диагностическим признаком в системе, при этом объектом наблюдений являются резонансы спектральных характеристик.

Процесс диагностирования происходит по изложенным ниже сценариям:

- вид диагностируемого оборудования первого контура;
- совокупность измерительных каналов, необходимых для диагностирования именно данного элемента первого контура;
- параметры измерения (количество отсчетов, частоты дискретизации и т.д.);
- алгоритмы обработки;
- вид и объем информации, полученной в результате диагностирования.

При этом выделяется не одно множество резонансов, а несколько, каждое из которых принадлежит определенному аномальному явлению.

Сценарии включают в себя следующие элементарные операции:

- чтение входных процессов, установление частоты дискретизации ($f_{ц}$), диапазон частот ($f_{ц}$); число точек в одном канале;
- предварительная обработка: центрирование, исключение линейного тренда, проведение (0,1) – процесса;
- фильтрация (низкая, высокочастотная, полосовая);
- оценка корреляционной функции (авто-, взаимокорреляционная функции), автоспектральной и взаимоспектральной плотности (модуль и фаза), когерентности;
- операции с множеством частот: выделение частот локальных максимумов; объединение и пересечение множеств частот экстремумов;
- подготовка текстовой и табличной информации, отображающей итоги реализации конкретного сценария.

Блок-схема функционирования ИСМД представлена ниже.

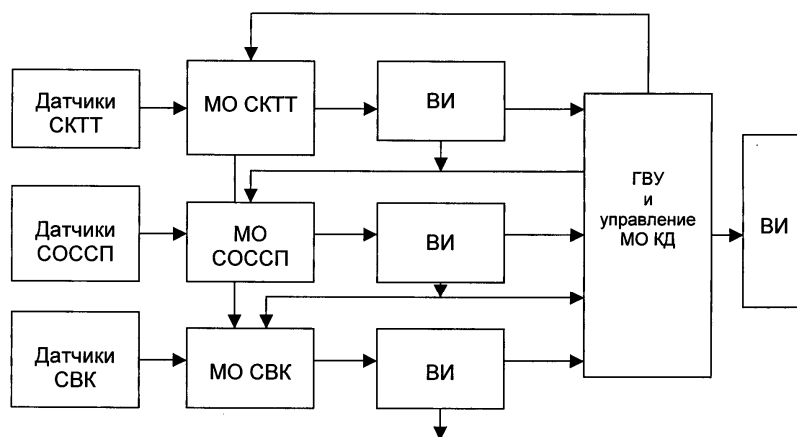


Рис. Функциональная схема ИСМД: СКТТ – система контроля течи теплоносителя; СОССП – система обнаружения свободных и слабозакрепленных предметов; СВК – система вибрационного контроля; МО – математическое обеспечение; ВИ – выходная информация (текстовая и графическая); КД – комплексное диагностирование; ГВУ – главное вычислительное устройство

При разработке МО ИСМД важное значение приобретает оптимальное разбиение и синтез комплекса задач по уровням иерархии системы. Эта проблема успешно может быть решена в процессе создания и испытаний ИСМД, главным образом испытаний эффективности отдельных алгоритмических блоков и системы в целом.

В настоящее время первая часть проблемы решена нами и экспериментально испытана на ААЭС, однако разработки по решению проблемы в целом продолжаются. При этом главные усилия направлены на выбор оптимального состава задач по уровням иерархии, оптимизацию информационных потоков и структуры системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Петросян В.Г., Шахвердян С.В.** Система контроля течи теплоносителя из первого контура ВВЭР – 440. Алгоритм локализации течи: Сб. докл. 1-й Межд. энерг. конф. в Армении. – Ереван, 1998. – С.63-74.
2. **Маркосян Г.Р., Петросян В.Г., Шахвердян С.В., Асланян М.А.** Совершенствование диагностической системы «Альс» для определения места течи теплоносителя из первого контура ВВЭР – 440 // Теплоэнергетика. – 2000. – №5 – С.15-20.
3. **Петросян В.Г., Маркосян Г.Р., Шахвердян С.В.** Иерархический алгоритм локализации протечки из первого контура ВВЭР-440 // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. – 2001. –Т. 54, № 1. – С. 47-51.
4. **Петросян В.Г., Маркосян Г.Р., Шахвердян С.В.** Методы локализации источника энергии в СОССП // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. – 2001. – Т.54, №2. – С.218-222.
5. **Петросян В.Г., Шахвердян С.В., Асатрян В.Г.** Опыт эксплуатации системы контроля течи теплоносителя (СКТТ) на энергоблоке №2 Армянской АЭС // Теплоэнергетика. – 2001. – №12 – С.22-25.
6. **Петросян В.Г., Гюлбудагян Р.Р.** Совершенствование систем диагностики состояния оборудования на Армянской АЭС // Теплоэнергетика. – 2002. – №5– С.31-35.

Ин-т «Арматом». Материал поступил в редакцию 12.07.2003.

Վ. Գ. ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ

ՋՋԷՌ-440 ՏԻՊԻ ԱԷԿ-ԵՐԻ ՎԵՐԱՀԱՄԱՐՄԱՆ ԵՎ ԱԽՏՈՐՈՇՄԱՆ ԻՆՏԵԳՐԱԼ ՀԱՄԱԿԱՐԳԻ ԱԼԳՈՐԻԹՄԵՐԻ ՀԱՄԱԽՈՒՄԲ

Ներկայացված են ՋՋԷՌ-440 տիպի ԱԷԿ-երի սարքավորումների վերահսկման եւ ախտորոշման ինտեգրալ համակարգի կառուցման հիմունքները, նկարագրված է երեք մոդուլներից բաղկացած համակարգի ալգորիթմական կառուցվածքը: Հայկական ԱԷԿ-ի 2-րդ էներգաբլոկում շահագործման փորձի հիման վրա ցույց է տրված համակարգի նպատակահարմարությունը համալիր վերահսկման և առանձին մոդուլների ինտեգրման տեսանկյունից:

V.G. PETROSYAN

ALGORITHM COMPLEX OF INTEGRATED SYSTEM FOR MONITORING AND DIAGNOSTICS AT NPP WITH THE WWER-440 REACTOR

The design principles of the integrated system for equipment monitoring and diagnostics at NPP with the reactor of WWER-440 type are presented. The system algorithmic structure with three key modules is described. Using the experience of the system operation at unit 2 of Armenian NPP the advisability of such a system is deduced from complex diagnostics and integration of separate modules view point.

Ц.А. МАЛАКЯН

РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОДЫ ВО ВСАСЫВАЮЩЕМ ТРУБОПРОВОДЕ АВАРИЙНОГО СЕЙСМИЧЕСКОГО НАСОСА ААЭС ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ ОКРУЖАЮЩЕГО ВОЗДУХА

При крупных авариях или проектных сейсмических воздействиях, при которых исключается возможность штатного расхолаживания, проектно предусмотрено использование системы аварийного расхолаживания высокого давления. Вода к аварийным сейсмическим насосам (АСН) подается по всасывающему трубопроводу, где возможно ее замерзание при низких температурах окружающей среды. Результаты расчетов показали, что температура окружающей среды, при которой начинается замерзание воды во всасывающем трубопроводе, равна $-31,5^{\circ}\text{C}$.

Ключевые слова: безопасность атомных станций, система аварийного расхолаживания высокого давления, экстремальные природные условия.

Введение. Анализ расчета возможности замерзания воды во всасывающем трубопроводе аварийного сейсмического насоса (АСН) на участке соединения с баком запаса обессоленной воды (БЗОВ) при экстремальных природных условиях выполнен в рамках вероятностного анализа безопасности ААЭС.

Баки с запасом обессоленной воды находятся на площадке АЭС. Основная роль данных баков заключается в подаче химобессоленной воды насосам системы аварийного расхолаживания высокого и низкого давления при крупных авариях или сейсмических воздействиях в случае повреждений основного оборудования второго контура, исключающих возможность штатного расхолаживания АЭС. Химобессоленная вода из БЗОВ подается на АСН по всасывающему трубопроводу АСН, который, проходя под землей, соединяется с БЗОВ в бетонном помещении, находящемся на площадке АЭС и граничащем с окружающей средой.

Согласно технологическому регламенту, температура в БЗОВ должна поддерживаться не ниже 5°C [1]. В холодное время года вода в баках обогревается паром, который подается в БЗОВ через обогревающий трубопровод и проходит через то же самое помещение (рис. 1), т.е. является единственным источником тепла для нагревания данного помещения. Кроме того, во избежание замерзания воды в баках и всасывающих трубопроводах АСН при температуре наружного воздуха $\leq 8^{\circ}\text{C}$ ежедневно с 2^{00} до 4^{00} включают на рециркуляцию два АСН поочередно по одному часу каждый.

Бетонное помещение, через которое проходят всасывающий трубопровод АСН и обогревающий трубопровод, в холодное время не обогревается отопительной системой. Единственным источником тепла для нагрева данного помещения являются потери энергии из обогревающего трубопровода. Часть бетонного помещения находится ниже нулевой отметки. Исходя из вышесказанного, при

температуре окружающей среды ниже 0°C возможно понижение температуры в бетонном помещении и тем самым замерзание воды во всасывающем трубопроводе АСН.

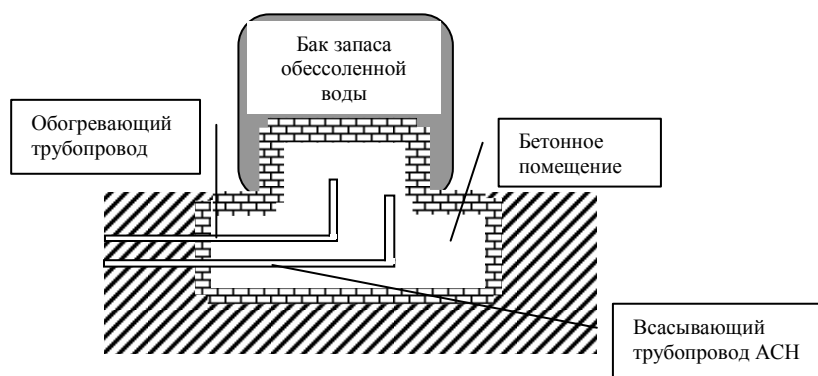


Рис. 1. Схематическое изображение помещения и трубопроводов

Целью расчета является определение температуры окружающего воздуха, при которой происходит замерзание воды во всасывающем трубопроводе АСН на участке соединения с БЗОВ. При этом температура воды на концах трубопровода принимается равной 5°C .

Методика расчета. Задача определения температуры во всасывающем трубопроводе АСН разделена на две стадии. В первой стадии вычисляется температура в помещении, исходя из потерь энергии через бетонные стенки в окружающую среду и поступления энергии из греющего трубопровода БЗОВ. Во второй стадии, исходя из результатов, полученных для температуры в помещении, вычисляется температура во всасывающем трубопроводе. В обеих стадиях коэффициенты теплоотдачи и теплопроводности материалов считаются постоянными в течение всего расчета. Тепловые потери от бетонной стенки к земле не учитываются, поскольку незначительны по отношению к утечкам энергии через бетонные стенки в окружающую среду.

Для расчета коэффициентов теплоотдачи использовались следующие критериальные уравнения [2]:

- ламинарное течение пара в трубопроводе между обогревающим паром и трубопроводом:

$$\text{Nu}_L = 4,264;$$

- свободная конвекция около горизонтальной трубы между трубопроводом и воздухом:

$$\text{Nu}_D = 0,36 + \frac{0,518\text{Ra}_D^{1/4}}{\left[1 + (0,559/\text{Pr})^{9/16}\right]^{4/9}};$$

- свободная ламинарная конвекция вдоль вертикальной пластинки между бетонной стенкой и окружающей средой:

$$Nu_L = 0,678Ra_L^{1/4} \left(\frac{Pr}{0,952 + Pr} \right)^{1/4}.$$

Для расчета температуры воздуха в помещении используется точечная модель. Температура в помещении усреднена по всему объему и рассчитывается по уравнению теплового баланса

$$Mc_p \frac{dt}{d\tau} = R_h l_h (t_s - t) - R_{ata} S_r (t - t_{ata}), \quad (1)$$

где M - масса воздуха в помещении; C_p - удельная теплоемкость воздуха; t_s - температура пара в греющем трубопроводе; t - температура воздуха в помещении; t_{ata} - температура окружающей среды; l_h - длина греющего трубопровода; S_r - площадь помещения, граничащего с окружающей средой.

Потери через бетонные стены и приток энергии от греющего трубопровода БЗОВ учитываются, соответственно, коэффициентом теплопередачи для бесконечной пластинки R_{ata} и линейным коэффициентом теплопередачи для бесконечного цилиндра R_h :

$$R_{ata} = \frac{1}{1/h_{ata} + d_{con}/\lambda_{con} + 1/h_{con}}, \quad (2)$$

$$R_h = \frac{\pi}{1/h_r d_{cl_o} + 1/2\lambda_{cl} \ln d_{cl_o}/d_{cl_i} + 1/h_s d_{cl_i}}, \quad (3)$$

где h_r , h_s , h_{ata} , h_{con} - коэффициенты теплоотдачи между паром греющего трубопровода и трубопроводом, трубопроводом и воздухом, бетонной стеной и окружающей средой, бетонной стеной и воздухом в помещении соответственно; λ_{cl} , λ_{con} - коэффициенты теплопроводности греющего трубопровода и бетона соответственно; d_{cl_o} - внешний диаметр греющего трубопровода; d_{cl_i} - внутренний диаметр греющего трубопровода; d_{con} - толщина бетонной стены.

Решая уравнение (1) для температуры воздуха в помещении, с учетом начального условия $t(0)=0^\circ\text{C}$ получим

$$t = t_0 e^{-\frac{(R_h l + R_{ata} S_r) \tau}{Mc_p}} + \frac{R_h l t_{ata} + R_{ata} S_r t_s}{R_h l + R_{ata} S_r} \times \left(1 - e^{-\frac{(R_h l + R_{ata} S_r) \tau}{Mc_p}} \right). \quad (4)$$

Из (4) видно, что при стационарном состоянии ($\tau \rightarrow \infty$):

$$t = \frac{R_h l t_{ata} + R_{ata} S_r t_s}{R_h l + R_{ata} S_r}. \quad (5)$$

Во второй стадии для расчета температуры воды во всасывающем трубопроводе АСН использовалось уравнение теплового баланса с граничными условиями $t(x, 0) = 5^{\circ}C, t(\pm H, \tau) = 5^{\circ}C$:

$$\rho c_{p-w} S \frac{\partial t}{\partial \tau} = \lambda_w S \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} - R_{cl-a} 2H(t - t_{ss}), \quad (6)$$

где ρ - плотность воды в трубопроводе; c_{p-w} - удельная теплоемкость воды; S -площадь поперечного сечения всасывающего трубопровода АСН; λ_w - коэффициент теплопроводности воды; R_{cl-a} - линейный коэффициент теплопередачи для бесконечного цилиндра.

Для учета тепловых потерь в боковом направлении в уравнение теплового баланса был введен член, где в качестве функции от температуры по длине трубопровода задается количество тепла, проходящего через боковую поверхность:

$$R_{cl-a} = \frac{\pi}{\frac{1}{2\lambda_{asn}} \ln \frac{d_{asn} + 2\Delta_1}{d_{asn}} + \frac{1}{2\lambda_{iz}} \ln \frac{d_{asn} + 2\Delta_1 + 2\Delta_2}{d_{asn} + 2\Delta_1} + \frac{1}{h_{at-a} (d_{asn} + 2\Delta_1 + 2\Delta_2)}},$$

где λ_{asn} - коэффициент теплопроводности всасывающего трубопровода АСН; λ_{iz} - коэффициент теплопроводности изоляции; $2H$ - длина трубопровода АСН; h_{at-a} - коэффициент теплоотдачи между трубопроводом и воздухом; d_{asn} - диаметр всасывающего трубопровода АСН; Δ_1 - толщина стенки всасывающего трубопровода АСН; Δ_2 - толщина изоляции всасывающего трубопровода АСН.

Данная функция является решением дифференциального уравнения теплопроводности для бесконечной цилиндрической поверхности. Правомочность использования такой модели исходит из того, что длина трубопровода намного больше его радиуса ($r/L=0,118/18 \approx 0,0065$).

Для определения температуры во всасывающем трубопроводе АСН приняты следующие допущения:

- в трубопроводе не возникают конвективные токи и теплообмен осуществляется только за счет теплопроводности. Данное допущение обосновано тем, что вода во всасывающем трубопроводе АСН при нормальной эксплуатации находится в стоячем состоянии. Всасывающий трубопровод АСН имеет горизонтальную ориентацию в помещении [3];
- температура на концах трубопровода считается постоянной и равной минимально допустимой температуре в БЗОВ [1].

Решение уравнения (6) будем искать в виде разложения в ряд Фурье по собственным функциям однородного уравнения:

$$t = \sum_{n=1}^{\infty} C_n \varphi_n. \quad (7)$$

Собственными функциями однородного уравнения (6) с учетом граничных условий являются

$$\varphi_n = \cos(\eta_n x), \quad \eta_n = \frac{2n-1}{2H} \pi.$$

Решение уравнения (6) для температуры воды в трубопроводе с использованием (7) имеет следующий вид:

$$t(x, \tau) = t_0 + (t_{ss} - t_0) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{f_n}{\xi_n} (1 - e^{-\xi_n \tau}) \cos\left(\frac{2n-1}{2H} \pi x\right), \quad (8)$$

$$\xi_n = \frac{R_{cl-a} 2H}{S \rho c_{p-w}} + a \left(\frac{2n-1}{2H} \pi \right)^2,$$

$$f_n = \frac{4 \frac{R_{cl-a} 2H}{S \rho c_{p-w}} \sin\left(\frac{2n-1}{2} \pi\right)}{(2n-1)\pi}.$$

Из (8) видно, что при стационарном состоянии ($\tau \rightarrow \infty$):

$$t_{s_asn}(x) = t_0 + (t_{ss} - t_0) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{f_n}{\xi_n} \cos\left(\frac{2n-1}{2H} \pi x\right),$$

$$\min(t_{s_asn}(x)) = t_0 + (t_{ss} - t_0) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{f_n}{\xi_n}.$$

Результаты расчета. Так как в холодное время года в течение суток всасывающий трубопровод АСН находится в состоянии контроля только в продолжение 2 часов, при котором насосы АСН включаются в рециркуляцию, то одним из факторов для данной задачи является определение времени, при котором температура в трубопроводе опустится ниже 0°C . Если данная температура достигается в течение времени больше, чем 22 часа, то можно утверждать, что замерзание невозможно.

Результаты расчета показали, что при $t_{ata} = -40^\circ\text{C}$ температура в помещении снижается до -17°C (рис. 2), а температура во всасывающем трубопроводе АСН достигает 0°C в течение 13,5 часов, и вода замерзает (рис. 3).

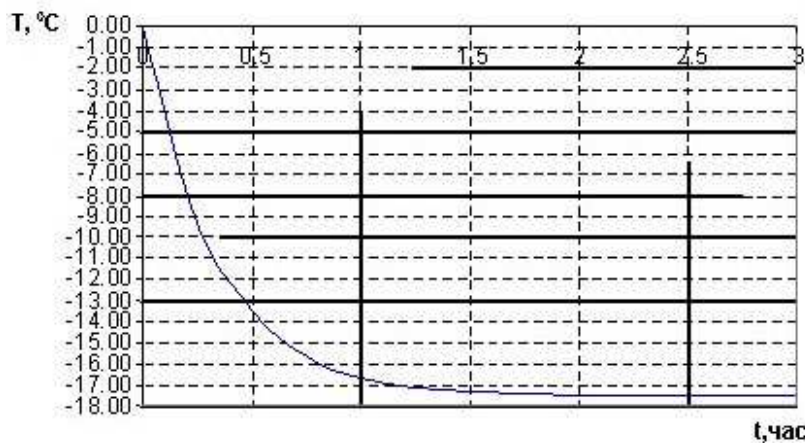


Рис.2.
Изменение температуры в помещении

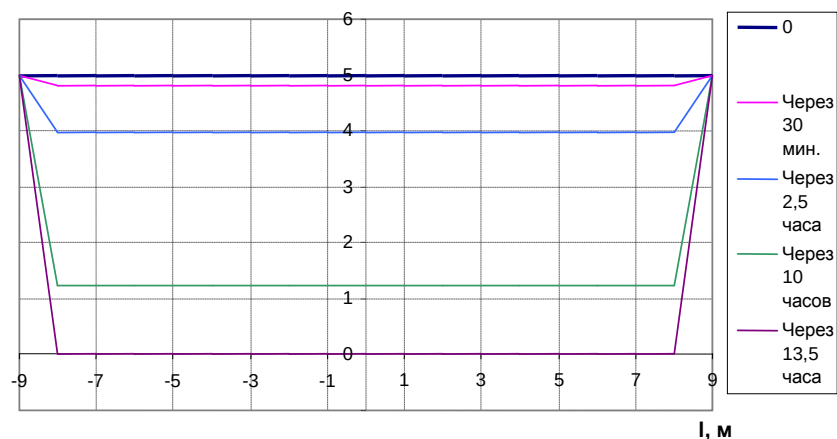


Рис.3. Температура во всасывающем трубопроводе АСН

Также был проведен обратный расчет для определения минимальной температуры окружающей среды, при которой температура воды во всасывающем трубопроводе будет выше 0°C в течение 22 часов.

Результаты показали, что температура окружающей среды в этом случае может быть не ниже $-31,5^{\circ}\text{C}$.

Заключение. Таким образом, результаты расчетов показали, что при температуре окружающей среды, равной -40°C , возможно замерзание воды во всасывающем трубопроводе АСН, что может привести к невозможности подачи воды от системы аварийного расхолаживания высокого давления в парогенераторы при аварийных режимах. Температура окружающей среды, при которой температура воды во всасывающем трубопроводе будет выше 0°C в течение 22 часов, должна быть не ниже $-31,5^{\circ}\text{C}$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Технологический регламент ААЭС.- Ереван, 1995.- 286 с.
2. **Lienhard John H.** Heat transfer text-book, third edition.- Cambridge Massachusetts, 2002. Phlogiston press.- 738 p.
3. **Исаченко И.** Теплопередача. Изд. 2-е. - М.: Энергия, 1969. - 440 с.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 03.12.2003.

Ց.Ա. ՄԱԼԱԿՅԱՆ

ՋՐԻ ՋԵՐՄԱՍՏԻՃԱՆԻ ՈՐՈՇՈՒՄԸ ՀԱՅԿԱԿԱՆ ԱԷԿ-Ի ԲԱՐՁՐ ՃՆՇՄԱՆ ՎԹԱՐԱՅԻՆ ՀՈՎԱՅՄԱՆ ԵՆԹԱՀԱՄԱԿԱՐԳԻ ԽՈՂՈՎԱԿԱՇԱՐՈՒՄ ՇՐՋԱԿԱ ՄԻՋԱՎԱՅՐԻ ՑԱԾՐ ՋԵՐՄԱՍՏԻՃԱՆՆԵՐԻ ՊԱՅՄԱՆՆԵՐՈՒՄ

Մեծ վթարների կամ սեյսմիկ ազդեցությունների ժամանակ, երբ Հայկական ԱԷԿ-ի երկրորդ էներգաբլոկի երկրորդ կոնտուրի հիմնական սարքավորումները կարող են ենթարկվել վթարի, նախատեսված է բարձր ճնշման վթարային հովացման ենթահամակարգի օգտագործում: Մնուցման ջուրն այդ համակարգի պոմպերին տրվում է ստորգետնյա խողովակաշարով, որտեղ հնարավոր է ջրի սառեցում: Հաշվարկի արդյունքները ցույց են տալիս, որ շրջակա միջավայրի կրիտիկական ջերմաստիճանը (որի դեպքում խողովակաշարում սկսվում է ջրի սառեցումը) - 31,5°C է:

TS. A. MALAKYAN

WATER TEMPERATURE CALCULATION IN SUCTION PIPELINE OF EMERGENCY SEISMIC PUMP AT NPP RA AT LOW TEMPERATURE OF ENVIRONMENT

During super emergencies or design seismic actions when the possibility of standard cooling is excluded, the design foresees the use of a high pressure cooling emergency system. Water is fed into the emergency seismic pump by the suction pipeline where water freezing is possible at low temperatures of the environment. The results of calculation show that the temperature of the environment when water freezing begins in the suction pipeline is equal to - 31,5° C.

А. А. МАНКУЛОВ, О. В. БАГДАСАРЯН, Т. М. КНЯЗЯН

КАЧЕСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ ПОВЕДЕНИЯ АМПЛИТУДЫ ПЛОСКОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ В ОГРАНИЧЕННЫХ СРЕДАХ

Представление решения волнового уравнения в виде единого выражения позволило исследовать поведение амплитуды волны в ограниченных средах методом фазовой плоскости. Определены фазовые траектории, описывающие поведение амплитуды волны в однородных средах и на границах раздела сред. Проанализировано поведение амплитуды волны в смежных полупространствах и диэлектрическом слое.

Ключевые слова: метод фазовой плоскости, плоские волны, поведение амплитуды волны, границы раздела сред, неотражающий слой, согласующий слой.

Особенности взаимодействия плоской электромагнитной волны с одиночным слоем или слоистой структурой являются традиционным предметом исследования электродинамики и оптики, в частности [1,2]. Основой всех теоретических исследований до последнего времени являлось применение принципа суперпозиции волн в однородной среде. Для определения поведения амплитуды волны в среде такой подход требует решения волнового уравнения в каждом слое, образующем структуру. Новое, нетрадиционное представление решения волнового уравнения в виде единого выражения [3,4] позволяет определить поведение амплитуды поля волны как в линейной, так и в нелинейной среде методом фазовой плоскости, без решения волнового уравнения [5-8].

В настоящей работе исследовано поведение амплитуды поля в граничащих полупространствах и в одиночных слоях различной толщины. Рассмотрено нормальное падение волны на границы раздела пассивных линейных сред без потерь. В каждой из рассматриваемых сред должно выполняться уравнение Гельмгольца:

$$\frac{d^2 E_x(z)}{dz^2} + k_0^2 \varepsilon E_x(z) = 0, \quad (1)$$

где $k_0 = \omega/c$ - волновое число свободного пространства; ε - диэлектрическая проницаемость среды.

В работах [3,4] было предложено искать решение уравнения (1) в виде

$$E_x(z, t) = U(z) \cos(\omega t - S(z)), \quad (2)$$

где $U(z)$ и $S(z)$ - реальные величины, описывающие поведение амплитуды и фазы волны вдоль оси z .

Подстановка (2) в (1) приводит к системе дифференциальных уравнений, эквивалентной уравнению Гельмгольца:

$$\begin{cases} \frac{d^2 U(z)}{dz^2} - U(z) \left(\frac{dS(z)}{dz} \right)^2 + k_0^2 \varepsilon U(z) = 0, \\ 2 \frac{dU(z)}{dz} \cdot \frac{dS(z)}{dz} + U(z) \cdot \frac{d^2 S(z)}{dz^2} = 0. \end{cases} \quad (3)$$

Второе уравнение системы (3) имеет полный интеграл:

$$U^2(z) \cdot \frac{dS(z)}{dz} = P = \text{const}, \quad (4)$$

который пропорционален плотности потока энергии, т. е. вектору Пойнтинга [4], и описывает сохранение плотности потока энергии в среде без потерь и усиления. С учетом (4) система уравнений (3) сводится к виду

$$\begin{cases} \frac{dU}{dk_0 z} = Y, \\ \frac{dY}{dk_0 z} = \frac{\Pi^2 - \varepsilon U^4}{U^3}, \end{cases} \quad (5)$$

где $\Pi = P/k_0$.

Для получения фазовых траекторий необходимо избавиться от координаты z . Этого можно добиться, формально разделив первое уравнение системы (5) на второе. Полученное выражение есть уравнение изоклин [9], показывающее на фазовой плоскости $Y(U)$ направление касательных к фазовым траекториям:

$$\frac{dY}{dU} = \frac{\Pi^2 - \varepsilon U^4}{U^3 Y}. \quad (6)$$

Интегрирование уравнения (6) дает уравнение для фазовых траекторий [5-7]:

$$Y^2 + \frac{\Pi^2}{U^2} + \varepsilon U^2 = C. \quad (7)$$

Здесь C - константа интегрирования, пропорциональная средней плотности энергии волны в среде [7].

Особые точки U_s и Y_s , в которых направление касательной к фазовой траектории не определено [9], определяются из (6):

$$\Pi^2 - \varepsilon U_s^4 = 0, \quad Y_s = 0. \quad (8)$$

Выражения (7) и (8) дают полное аналитическое описание фазовых портретов. При фиксированном значении потока энергии (имеется особая точка и бесконечное множество фазовых траекторий с различным значением плотности энергии C). При отсутствии потока ($\Pi=0$) из уравнения (7) имеем

$$\frac{Y^2}{(\sqrt{C})^2} + \frac{U^2}{(\sqrt{C/\varepsilon})^2} = 1. \quad (9)$$

При $\varepsilon > 1$ фазовые траектории являются эллипсами вокруг особой точки $U_s = Y_s = 0$ типа "центр" (рис. 1а).

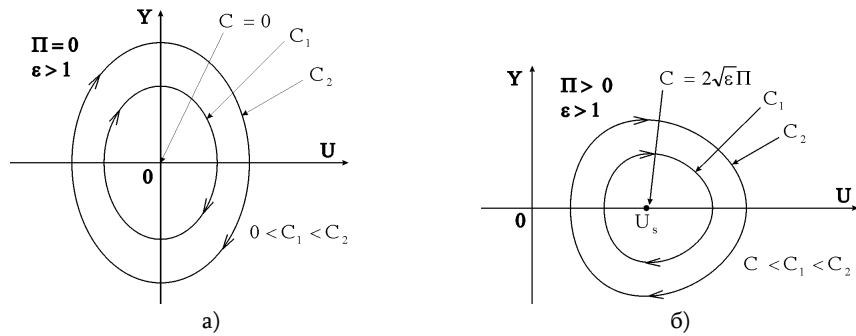


Рис. 1. Фазовые портреты при отсутствии (а) и наличии (б) потока энергии волны в среде

Движение по фазовой траектории происходит по часовой стрелке, т. к. при $Y > 0$ имеет место возрастание U , а при $Y < 0$ - спад. Траекториям соответствуют стоячие волны в среде как результат наложения встречных волн с равными амплитудами [2].

При наличии потока энергии в среде ((0 уравнение (7) преобразуется к виду

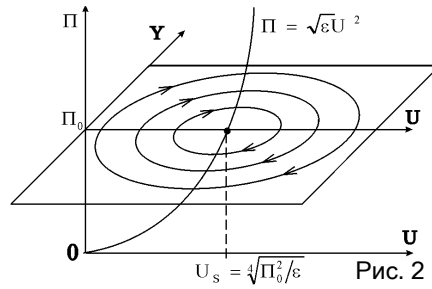
$$\frac{Y^2}{(\sqrt{C})^2} + \frac{U^2}{(\sqrt{CU^2/\sqrt{\Pi^2 + \epsilon U^4}})^2} = 1. \quad (10)$$

Уравнение (10) описывает замкнутую кривую, охватывающую особую точку $U_s = \sqrt[4]{\Pi^2/\epsilon}$, $Y_s = 0$ (рис. 1б). Поток энергии может переноситься как в виде однородной плоской волны (особая точка, амплитуда поля постоянна), так и при колебательном поведении амплитуды поля (фазовые траектории, охватывающие особую точку). Последним соответствует встречное движение плоских волн с различными амплитудами, т. е. режим частично стоячих волн [10].

На рис. 2 приведен график зависимости потока энергии волны Π в среде от амплитуды поля U . Фазовые траектории, описывающие поведение поля U вдоль оси z , показаны для фиксированного значения потока $\Pi = \Pi_0$. Парабола $\Pi = \sqrt{\epsilon} U^2$ задает множество особых точек для однородной среды с диэлектрической проницаемостью ϵ , а именно, возможные решения в виде однородных плоских волн. Пространственное распределение $U(z)$ получается интегрированием первого уравнения (5) с учетом (7) [6]. Одному обороту вдоль фазовой траектории соответствует полволны в среде [6]. Энергия волны C определяет действующую фазовую траекторию. Ограниченной среде, в зависимости от ее протяженности, соответствует определенный участок траектории.

Приступим к решению граничных задач.

На границах раздела сред имеем непрерывность амплитуды поля U , ее производной Y и плотности потока энергии ([7]). Вследствие этого границе раздела сред соответствует плавный переход с одной траектории (или особой точки) на другую, соответствующую среде с другой диэлектрической проницаемостью при том же потоке Π . Исходя из требования единственности, решение граничной задачи нужно начинать с неосвещенной стороны, где имеется единственная уходящая от границы однородная волна [11,12], продвигаясь далее к освещенной стороне.



Рассмотрим падение волны на границу раздела двух сред, граничащих в точке $z = 0$. Слева - среда с $\epsilon = \epsilon_2$, справа - с $\epsilon = \epsilon_1$ (рис. 3а). При потоке энергии $\Pi_0 > 0$ в области $z > 0$ имеем однородную бегущую волну $k \rightarrow +\infty$. На фазовой плоскости среды с $\epsilon = \epsilon_1$ ей соответствует особая точка $U_{s1} = \sqrt{\Pi_0^2/\epsilon_1}$. В левом полупространстве ввиду непрерывности имеем тот же поток Π_0 , но из-за скачка диэлектрической проницаемости он может обеспечиваться только в режиме частично стоячих волн. Поведение амплитуды поля вдоль оси z зависит от соотношения диэлектрических проницаемостей сред и задается фазовой траекторией среды $\epsilon = \epsilon_2$, проходящей через особую точку U_{s1} (рис.3а,б).

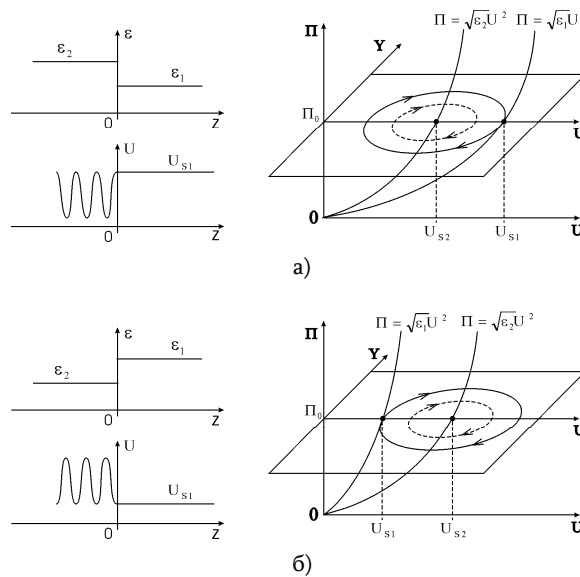


Рис. 3. К падению волны на границу раздела двух сред. Два возможных соотношения для диэлектрических проницаемостей ϵ_1 и ϵ_2 , соответствующие фазовые траектории при фиксированном потоке $\Pi = \Pi_0 > 0$ и поведение амплитуды поля U в обоих полупространствах

Рассмотрим падение плоской волны на слой диэлектрика с $\epsilon = \epsilon_2$ толщиной L , окруженного средой с $\epsilon = \epsilon_1$ (рис. 4а).

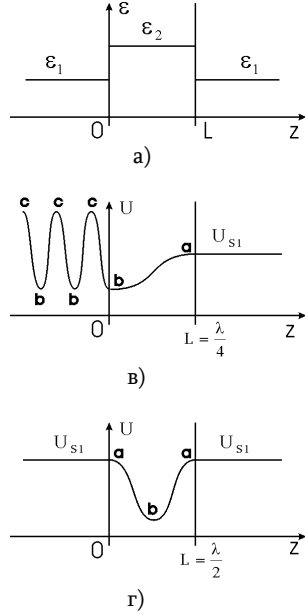
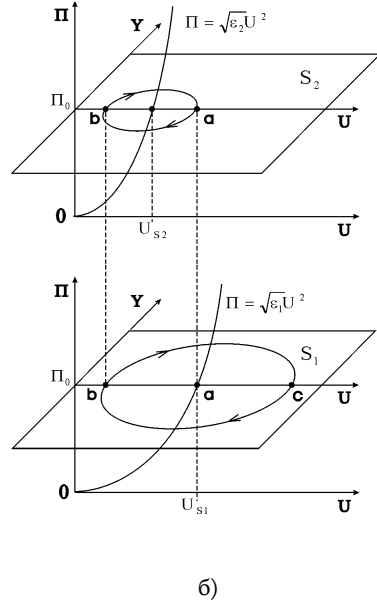


Рис. 4



б)

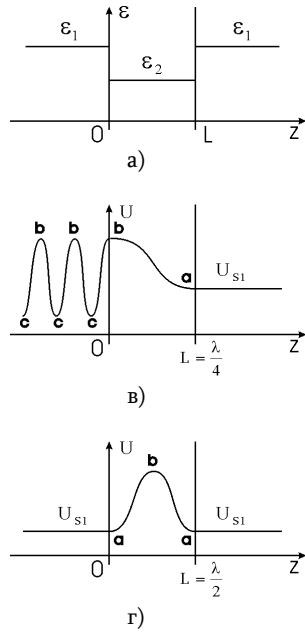
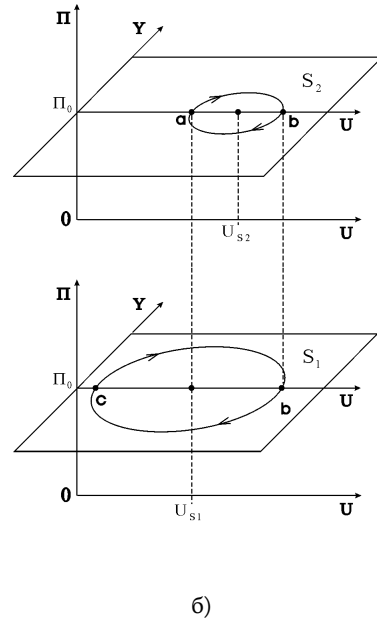


Рис. 5



б)

Рис. 4, 5. Однородный слой толщиной L (а), фазовые портреты в среде с $\epsilon = \epsilon_1$ (плоскость S_1) и $\epsilon = \epsilon_2$ (плоскость S_2) (б), распределение амплитуды электрического поля в случае четвертьволнового (в) и полуволнового (г) слоев. $U_{s1} > U_{s2}$ (рис. 4), $U_{s1} < U_{s2}$ (рис. 5)

Волна падает слева $\Pi = \Pi_0 > 0$. За слоем ($z \geq L$) имеем однородную плоскую волну с амплитудой $U(L) = U_{s1} = \sqrt[4]{\Pi_0^2/\epsilon_1}$ (точка “а” на фазовой плоскости S_1 среды с $\epsilon = \epsilon_1$ (рис. 4б)). Слой соответствует плоскости S_2 , на которой фазовая траектория, проходящая через точку “а”, описывает поведение поля. Движение по фазовой траектории происходит согласно стрелкам до достижения освещенной стороны слоя $z = 0$. Эта точка $U(z = 0)$, $Y(z = 0)$ проецируется на плоскость S_1 . Проходящая через нее фазовая траектория описывает поведение поля в левом полупространстве, где имеет место наложение падающей и отраженной волн. Рассмотрены характерные случаи: слой толщиной четвертьволны ($L = \lambda/4 = \lambda_0/4\sqrt{\epsilon_2}$) (рис. 4в) и полуволны ($L = \lambda/2 = \lambda_0/2\sqrt{\epsilon_2}$) (рис. 4г) в среде, где λ_0 – длина волны в свободном пространстве. При $\epsilon_2 > \epsilon_1$ меняется соотношение между особыми точками U_{s1} и U_{s2} и соответственно поведение поля (рис. 5).

Из рис. 4 и 5 видно, что слой толщиной, кратной половине длины волны (целое число оборотов по фазовой траектории), полностью прозрачен, независимо от его диэлектрической проницаемости. Это известное условие прозрачности полуволнового слоя [2].

Рассмотрим слой диэлектрика, окруженного с обеих сторон средами с различными диэлектрическими проницаемостями (рис. 6, 7). Волна падает слева. За слоем ($z < L$) имеем однородную плоскую волну с амплитудой $U(L) = U_{s1} = \sqrt[4]{\Pi_0^2/\epsilon_1}$ (точка “а” на фазовой плоскости S_2 слоя с $\epsilon = \epsilon_2$ (рис. 6б, 7б)). Траектория “ab” описывает поведение поля в слое. Если слой имеет толщину четвертьволны (пол-оборота по фазовой траектории) и точка “b” есть особая точка левого полупространства, то имеет место согласование сред (рис. 6в, 7в), и слой является “просветляющим”. Условие просветления имеет место также, если слой имеет толщину $L = n \cdot \lambda/2 + \lambda/4$, где $n=1,2,\dots$ (n полных оборотов плюс пол-оборота). Слой толщиной $\lambda/2$ уже не прозрачен, при этом в левом полупространстве имеем частично стоячую волну (рис. 6г, 7г), описываемую траекторией “ас” на плоскости S_3 . Диэлектрическая проницаемость просветляющего четвертьволнового слоя определяется из условия прохождения фазовой траектории “ab” через особые точки левого и правого полупространств. Подставляя эти значения в уравнение (7) для слоя с $\epsilon = \epsilon_2$ и учитывая неизменность энергии на траектории, получаем $\epsilon_2 = \sqrt{\epsilon_1 \epsilon_3}$. Это известное условие для четвертьволнового просветляющего слоя [2].

Метод фазовой плоскости позволил получить распределения амплитуды поля в ограниченных средах без решения граничных задач электродинамики.

Результаты исследования полностью согласуются с известными результатами, полученными ранее традиционными методами [1,2], и могут быть полезны при исследовании более сложных многослойных структур.

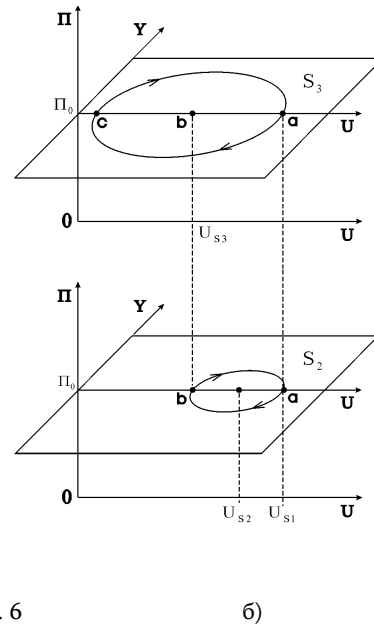
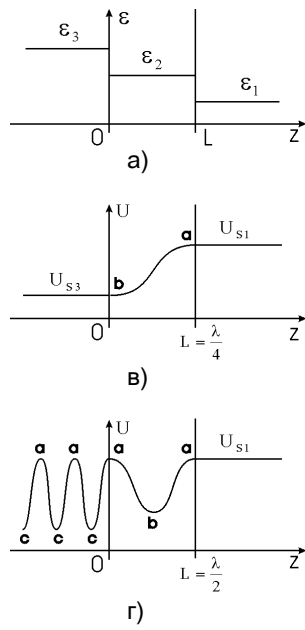


Рис. 6

б)

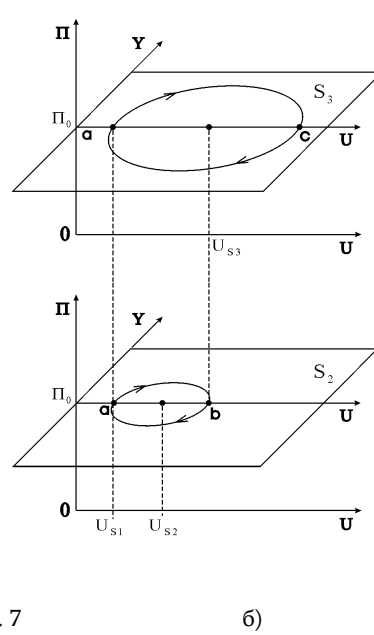
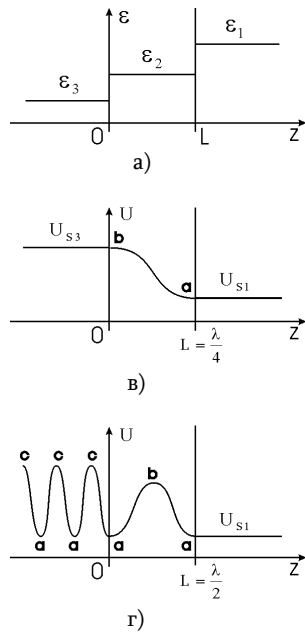


Рис. 7

б)

Рис. 6, 7. Однородный слой толщиной L (а), фазовые портреты в среде с $\epsilon = \epsilon_2$ (плоскость S_2) и $\epsilon = \epsilon_3$ (плоскость S_3) (б), распределение амплитуды электрического поля в случае четвертьволнового (в) и полуволнового (г) слоев. $U_{s1} > U_{s2} > U_{s3}$ (рис.6), $U_{s1} < U_{s2} < U_{s3}$ (рис. 7)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бреховских Л.М.** Волны в слоистых средах / АН СССР.- М., 1957. -502 с.
2. **Борн М., Вольф Э.** Основы оптики. -М.: Наука, 1973. -720 с.
3. **Силин В.П.** Нелинейная теория проникновения высокочастотного поля в проводник // ЖЭТФ.- 1967. -Т. 53, вып. 5(11). - С. 1662-1677.
4. **Басс Ф.Г., Вербицкий И.Л., Гуревич Ю.Г.** К теории распространения электромагнитных волн в нелинейных средах // Изв.вузов. Радиофизика. -1968. -Т. 11, № 10. - С. 1480-1489.
5. **Багдасарян О.В., Пермяков В.А.** Ветвление режимов и эффект ограничения потока энергии ТЕ-волны в среде с ионизационной нелинейностью // Изв.вузов. Радиофизика. -1978. -Т.21, № 9. - С. 1352-1362.
6. **Багдасарян О.В., Лебедев А.М., Пермяков В.А.** Закономерности прохождения плоской Н-волны через слой диэлектрика с отрицательной нелинейностью // Нелинейные оптические взаимодействия: Труды НИИ физ. конденс. сред / ЕГУ. -1987. - С. 169-188.
7. **Багдасарян О.В., Дарьян А.В.** Метод фазовой плоскости в теории распространения электромагнитных волн // Излучение и распространение электромагнитных волн: Межвуз. темат. сб. науч. тр. по радиотехнике / ЕрПИ. -1988. - С. 64 – 74.
8. **Багдасарян О.В., Дарьян А.В.** Прохождение плоской электромагнитной волны через слоистые структуры // Конструирование радиоэлектронных средств: Межвуз. сб. науч. тр. / ЕрПИ. - 1990. - С. 67-77.
9. **Андронов А. А., Витт А. А., Хайкин С. Э.** Теория колебаний - М.: Наука, 1981. – 568 с.
10. **Ramo S., Whinnery J. R., Van Duzer T.** Fields and waves in communication electronics, Wiley, NY. – 1994. - 844p.
11. **Baghdasaryan H.V.** Method of Backward Calculation // In Photonic Devices for Telecommunications (How to Model and Measure), ed. G. Guekos, Springer-Verlag, 1999. - P. 56-65.
12. **Baghdasaryan H. V., Knyazyan T. M.** Problem of plane EM wave self-action in multilayer structure: an exact solution // Optical and Quantum Electronics. -1999. - Vol. 31, No. 9-10. - P. 1059-1072.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 12.10.2003

**Ա. Ա. ՄԱՆԿՈՒԼՈՎ, Հ. Վ. ԲԱԴԴԱՍԱՐՅԱՆ, Թ. Մ. ԿՆՅԱԶՅԱՆ
ՍԱՀՄԱՆԱԲԱԿ ՄԻՋԱՎԱՅՐԵՐՈՒՄ ՀԱՐԹ ԷԼԵԿՏՐՈՄԱԳՆԻՏԱԿԱՆ ԱԼԻՔԻ
ԱՄՊԼԻՏՈՒԴԻ ՎԱՐՔԻ ՈՐԱԿԱԿԱՆ ՎԵՐԼՈՒԾՈՒԹՅՈՒՆ**

Ալիքային հավասարման լուծման՝ միասնական տեսքով ներկայացնելը հնարավորություն է ընձեռել փուլային հարթության մեթոդով հետազոտել ալիքի ամպլիտուդի վարքը սահմանափակ միջավայրերում: Որոշված են ալիքի ամպլիտուդի վարքը նկարագրող փուլային հետազոտող համասեռ միջավայրերում և վերջիններիս բաժանման սահմանների վրա: Վերլուծված է ալիքի ամպլիտուդի վարքը հարակից կիսատարածություններում և դիէլեկտրիկ շերտում:

A. A. MANKULOV, H. V. BAGHDASARYAN, T. M. KNYAZYAN

**QUALITATIVE ANALYSIS OF PLANE ELECTROMAGNETIC WAVE
AMPLITUDE BEHAVIOUR IN CONFINED MEDIA**

The wave equation solution representation in the form of single expression allowed to study the wave amplitude behaviour in confined media by the phase plane method. Phase trajectories describing the wave amplitude behaviour in homogeneous media and on medium boundaries are defined. The wave behaviour in adjacent halfspaces and dielectric layer is analysed.

Л.О. КАРАХАНИЯ

МЕТОД ВЫРАВНИВАНИЯ НАПРЯЖЕННОСТИ ОСЕСИММЕТРИЧНОГО ПОЛЯ

Рассматривается задача перераспределения напряженности электрического поля в межэлектродном пространстве цилиндрического конденсатора введением в основную полимерную изоляцию в расплавленном состоянии частиц наполнителя с высокой диэлектрической проницаемостью. Выведено аналитическое выражение зависимости объемной концентрации наполнителя от координаты заданной точки межэлектродного пространства, при которой обеспечивается равномерное распределение напряженности поля в неоднородной среде. Построены графики зависимости скорости инородной частицы от координаты при первоначальном неоднородном поле.

Ключевые слова: неоднородное электрическое поле, пондеромоторная сила, динамическая вязкость, диэлектрическая проницаемость.

В ряде электротехнических устройств с осесимметричным электрическим полем параметры диэлектрической среды выбираются, исходя из максимальной напряженности поля у поверхности проводника (электрода). В результате такого выбора коэффициент использования изоляции и надежность ее работы получаются низкими. Это обстоятельство приводит к заключению, что для создания совершенной изоляционной конструкции, помимо чистых диэлектрических материалов, необходимо также обеспечить равномерное распределение напряженности электрического поля внутри конструкции, что может привести к существенному снижению расхода диэлектрических материалов вследствие уменьшения толщины диэлектрика, а также повышению надежности работы.

Исследования электрической изоляции осесимметричных конструкций из полимеров показывают, что в принципе можно получить равномерное распределение напряженности электрического поля между цилиндрическими соосными электродами введением в полимерную среду частиц инородного диэлектрика с высокой диэлектрической проницаемостью.

В настоящей статье рассматривается возможность создания макроскопически однородного поля в цилиндрическом конденсаторе перераспределением концентрации частиц наполнителя с диэлектрической проницаемостью (ДП) большей, чем ДП жидкого диэлектрика (расплава), под воздействием сил электрического поля.

Из теории электростатического поля известно, что для выравнивания электрического поля в изоляции цилиндрического конденсатора диэлектрическая проницаемость в межэлектродном пространстве должна меняться по закону

$$\epsilon_r r = \text{const}, \quad (1)$$

где ϵ_r - диэлектрическая проницаемость элементарного слоя анизотропного диэлектрика толщиной dr на расстоянии r от оси.

Следовательно, для обеспечения равномерного распределения напряженности поля в осесимметричной системе электродов необходимо создать анизотропную композиционную среду, диэлектрическая проницаемость которой является функцией координаты r .

Как известно, при наполнении расплава диэлектрика мелкодисперсным наполнителем образуется хаотическая композиционная смесь, средняя диэлектрическая проницаемость которой определяется формулой Максвелла - Вагнера:

$$\epsilon_{cp} = \epsilon_1 + 3\epsilon_1 P \frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{\epsilon_2 + 2\epsilon_1}, \quad (2)$$

где ϵ_1 , ϵ_2 - диэлектрические проницаемости основного диэлектрика и наполнителя; P - объемная доля (концентрация) наполнителя.

Поскольку уравнение (1) имеет место для каждого сечения в композиционной смеси, то на основании (2) можно определить закон изменения концентрации частиц наполнителя вдоль радиуса r .

Принимая $P = 0$ при $r = R_2$ (у поверхности внешней обкладки), т.е. $\epsilon_{cp} = \epsilon_1$, получим

$$\left(\epsilon_1 + 3\epsilon_1 P \frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{\epsilon_2 + 2\epsilon_1} \right) r = R_2 \epsilon_1, \quad (3)$$

откуда зависимость концентрации частиц наполнителя от координаты определится формулой

$$P(r) = \frac{(R_2 - r)(\epsilon_2 + 2\epsilon_1)}{3r(\epsilon_2 - \epsilon_1)}. \quad (4)$$

При $r = R_1$ (у поверхности внутренней обкладки) P имеет максимальное значение и стремится к нулю у поверхности внешней обкладки. Для перераспределения концентрации частиц наполнителя по выражению (4) рассмотрим их перемещение в электрическом поле цилиндрического конденсатора. Пусть сферическая частица наполнителя радиуса a , плотностью вещества D , диэлектрической проницаемостью ϵ_2 находится в вязкой среде (расплаве) с диэлектрической проницаемостью ϵ_1 . Коэффициент динамической вязкости расплава равен η .

На поляризованную в электрическом поле частицу наполнителя действует пондеромоторная сила [1, 2]

$$F_n = 4\pi a^3 \frac{\epsilon_1(\epsilon_2 - \epsilon_1)}{\epsilon_2 + 2\epsilon_1} E |\text{grad} E|, \quad (5)$$

и скорости частицы от координаты при: мкм, Па.с, мм, мм, начальной поля в точке с координатой r : U - напряжение между обкладками.

С учетом (6) пондеромоторная сила определится формулой

$$F_n = 4\pi a^3 \frac{\epsilon_1(\epsilon_2 - \epsilon_1)}{\epsilon_2 + 2\epsilon_1} \frac{U^2}{r^3 \left(\ln \frac{R_2}{R_1} \right)^2}. \quad (7)$$

Кроме силы F_n , на движущуюся частицу действует сила сопротивления Стокса, которая при малых скоростях пропорциональна первой степени скорости частицы [3]:

$$F_c = 6\pi a \eta V, \quad (8)$$

где V - скорость.

Уравнение движения частицы получается согласно принципу Даламбера с учетом приложенных к частице сил F_n , F_c и силы инерции

$$m \frac{dV}{dt} + 6\pi a \eta V - 4\pi a^3 \frac{\epsilon_1(\epsilon_2 - \epsilon_1)}{\epsilon_2 + 2\epsilon_1} \frac{U^2}{r^3 \ln \frac{R_2}{R_1}} = 0, \quad (9)$$

где $m = \frac{4}{3} \pi a^3 D$ - масса сферической частицы.

Предполагается, что ускорение частицы направлено к оси конденсатора, а r отсчитывается от оси. Преобразуем уравнение (8) для получения зависимости мгновенной скорости от координаты r :

$$V \frac{dV}{dr} = \frac{-6,5\eta V}{a^2 D} + \frac{3\epsilon_1(\epsilon_2 - \epsilon_1)}{\epsilon_2 + 2\epsilon_1} \frac{U^2}{r^3 \ln \frac{R_2}{R_1}}. \quad (10)$$

Решение нелинейного уравнения (9) осуществлено методом Рунге - Кутты. По результатам расчета на рис. 1 - 3 приведены графики зависимости скорости частицы от координаты при: $a = 100 \text{ мкм}$, $\eta = 10 \text{ Па.с}$, $\epsilon_2 = 125\epsilon_1$, $R_1 = 10 \text{ мм}$, $R_2 = 15 \text{ мм}$, начальной координате частицы 15 мм , $D = 5 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ и напряжении $U = 6, 12, 18 \text{ кВ}$ соответственно.

Поскольку сила F_c тормозит частицу, а F_n ускоряет, в результате она ускоряется. Однако при реализуемых на практике значениях напряжений U скорости частицы малы, т.е. составляют доли миллиметра в секунду (рис. 1 - 3).

Определим начальную концентрацию наполнителя и его объем для пространства между коаксиальными электродами радиусами R_1 и R_2 , обеспечивающую равномерное распределение (выравнивание) электрического поля. Выделим в межэлектродном пространстве длиной l кольцевую полосу радиуса r и шириной dr , объем которой определится выражением

$$dV = 2\pi l r dr. \quad (11)$$

Занятый наполнителем объем при этом будет равен

$$dV_{\text{нап}} = P dV, \quad (12)$$

где P выражается по (4).

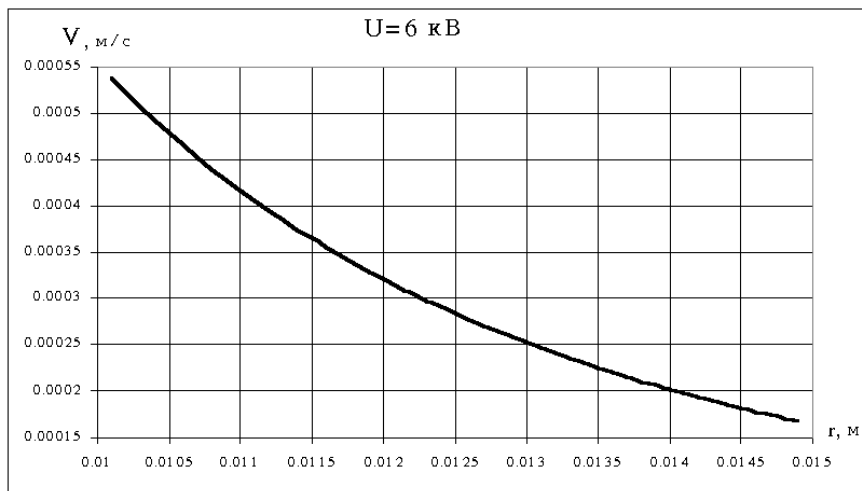


Рис.1. Зависимость скорости частицы от координаты при $U = 6$ кВ

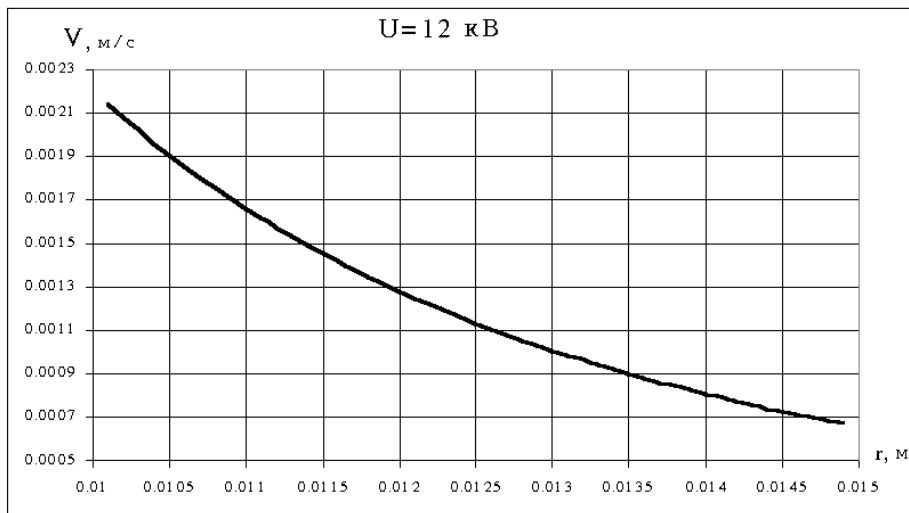


Рис.2. Зависимость скорости частицы от координаты при $U = 12$ кВ

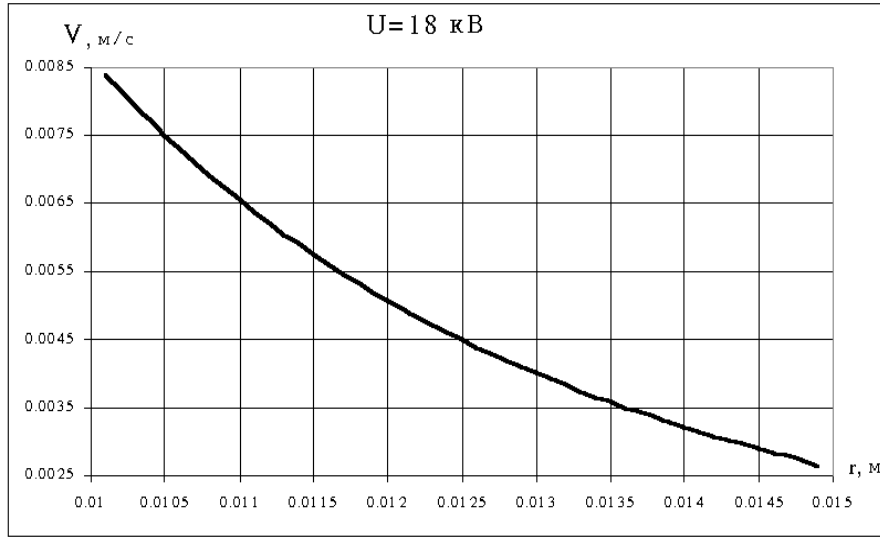


Рис.3. Зависимость скорости частицы от координаты при $U = 18 \text{ кВ}$

Следовательно,

$$dV_{\text{нап}} = 2\pi l r dr \frac{(R_2 - r)(\epsilon_2 + 2\epsilon_1)}{3r(\epsilon_2 - \epsilon_1)}. \quad (13)$$

Интегрируя (12) в пределах от R_1 до R_2 , получим

$$V_{\text{нап.}} = \int_{R_1}^{R_2} \frac{2\pi l (\epsilon_2 + 2\epsilon_1)(R_2 - r)dr}{3(\epsilon_2 - \epsilon_1)r} = \frac{2\pi l (\epsilon_2 + 2\epsilon_1)}{3(\epsilon_2 - \epsilon_1)} \left[R_2(R_2 - R_1) - \frac{R_2^2 - R_1^2}{2} \right] = \quad (14)$$

$$= \frac{\pi l (\epsilon_2 + 2\epsilon_1)}{3(\epsilon_2 - \epsilon_1)} (R_2 - R_1)^2.$$

В соответствии с определением первоначальной концентрации наполнителя (до перераспределения) имеем

$$P_{\text{н.}} = \frac{V_{\text{нап.}}}{V} = \frac{(R_2 - R_1)^2 (\epsilon_2 + 2\epsilon_1)}{3(\epsilon_2 - \epsilon_1)(R_2^2 - R_1^2)}, \quad (15)$$

поскольку объем межэлектродного пространства равен

$$V = \pi(R_2^2 - R_1^2)l. \quad (16)$$

Таким образом, объем наполнителя, необходимый для выравнивания напряженности электрического поля между соосными цилиндрическими электродами конденсатора, кроме геометрических размеров, зависит также от диэлектрических проницаемостей наполнителя и основного диэлектрика.

Выводы

Скорость движения сферической частицы наполнителя в неоднородном электрическом поле, в вязкой среде прямо пропорциональна динамической вязкости среды и квадрату напряжения между электродами.

1. Перераспределение концентрации частиц наполнителя вдоль радиуса данного сечения будет устанавливаться по мере выравнивания напряженности поля в межэлектродном пространстве.
2. По известным геометрическим размерам и значениям электрофизических параметров полимерного диэлектрика и наполнителя можно определить необходимый объем наполнителя на единицу длины конденсатора по полученному аналитическому выражению.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Тамм И.Е.** Основы теории электричества. - М.: Наука, 1976. – 616 с.
2. **Татур Т.А.** Основы теории электромагнитного поля. - М.: Высш. шк., 1989. – 270 с.
3. **Сой С.** Гидродинамика многофазных систем. - М.: Мир, 1971. - 536с.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 19.11.2002.

Լ.Հ. ԿԱՐԱԽԱՆՅԱՆ

ԱՌԱՆՑՔԱՀԱՄԱՉԱՓ ԴԱՇՏԻ ԼԱՐՎԱԾՈՒԹՅԱՆ ՀԱՎԱՍԱՐԵՑՄԱՆ ՄԵԹՈԴ

Դիտարկվում է գլանական կոնդենսատորի միջէլեկտրոդային տարածության մեջ էլեկտրական դաշտի լարվածության վերաբաշխման խնդիրը՝ հալված վիճակում գտնվող հիմնական պոլիմերային մեկուսացման մեջ բարձր դիէլեկտրիկական թափանցելիությամբ լցանյութի մասնիկներ մտցնելու միջոցով: Արտածված է խտության բանաձև, որն արտահայտում է լցանյութի ծավալային կոնցենտրացիայի կախումը միջէլեկտրոդային տարածության տրված կետի կոորդինատից. վերջինիս իրագործման դեպքում ապահովվում է դաշտի լարվածության հավասարաչափ բաշխումն անհամասեռ միջավայրում: Կառուցված են մասնիկի արագության կախումը կոորդինատից արտահայտող գրաֆիկներ՝ սկզբնական անհամասեռ էլեկտրական դաշտի դեպքում:

L.H. KARAKHANYAN

METHOD OF EQUALIZING AXISYMMETRICAL FIELD INTENSITY

The electric field intensity redistribution problem in cylindrical condenser interelectrode space by introducing filler particles with high permeability into the main polymer insulation being in melted state is considered. An analytical formula reflecting the filler volume concentration dependence on the given point coordinates in interelectrode space is derived and the uniform distribution of field intensity in non-homogeneous medium is provided. The graphs of foreign particle velocity dependence on coordinates in initial non-uniform electric field are plotted.

А.Г. АВЕТИСЯН, С.О. СИМОНЯН, Г.А. БАДАЛЯН

АНАЛОГ МЕТОДА ФАДДЕЕВА ДЛЯ НЕАВТОНОМНЫХ МАТРИЦ

Предложен достаточно простой и весьма эффективный метод одновременного определения некоторых инвариантов неавтономных матриц.

Ключевые слова: дифференциально-тейлоровские преобразования, неавтономная матрица, собственный многочлен, обратная матрица, собственные векторы.

Введение. При применении дифференциально-тейлоровских (ДТ) преобразований [1] были предложены регулярные методы решения следующих важных научно-практических задач, имеющих многочисленные приложения при исследовании различных вопросов неавтономных динамических систем: определение детерминанта матрицы системы [2], расщепление системы (приведение к диагональному виду) [3,4], нахождение собственного многочлена [5], решение полной проблемы собственных значений [6] и др. В настоящей работе предлагается ДТ-аналог известного метода Фаддеева [7], предназначенный для определения собственного многочлена, обратной матрицы и собственных векторов неавтономной матрицы, при предположении, что собственные значения этой матрицы заранее известны или определены каким-то образом (см., например, [6]).

Математический аппарат. Пусть задана функция $x(t)$, обладающая бесконечной гладкостью в некоторой точке $t=t_0$. При этом ДТ-преобразования имеют вид

$$X(K) = \frac{H^K}{K!} \frac{\partial^K x(t)}{\partial t^K} \Big|_{t=t_0}, \quad K = \overline{0, \infty} \quad \hat{=} \quad x(t) = \sum_{K=0}^{\infty} \left(\frac{t-t_0}{H} \right)^K X(K), \quad (1)$$

(прямое преобразование) (обратное преобразование)

где $X(K)$ - изображение (дискрета) оригинала $x(t)$ (функция целочисленного аргумента $K = \overline{0, \infty}$); H - некоторая постоянная (масштабный коэффициент); t_0 - центр аппроксимации; $\hat{=}$ - знак перехода из области изображений в область оригиналов и наоборот.

Собственный многочлен автономной матрицы $A = (a_{ij})$, $i, j = \overline{1, n}$, имеет вид

$$\det[A - \lambda E] = (-1)^n P(\lambda) = (-1)^n [\lambda^n + p_1 \lambda^{n-1} + p_2 \lambda^{n-2} + \dots + p_n] = 0, \quad (2)$$

где λ_i , $i = \overline{1, n}$ - собственные числа матрицы, а p_i , $i = \overline{1, n}$ - коэффициенты собственного многочлена, подлежащие определению.

Согласно методу Фаддеева [7], для решения этой задачи строится следующая цепочка последовательностей:

$$\begin{aligned}
\text{Шаг 1. } A_1 &= A, & \text{sp}A_1 &= p_1, & B_1 &= A_1 - p_1 E. \\
\text{Шаг 2. } A_2 &= AB_1, & \frac{1}{2} \text{sp}A_2 &= p_2, & B_2 &= A_2 - p_2 E. \\
&\vdots & \vdots & & \vdots & \\
\text{Шаг } n-1. A_{n-1} &= AB_{n-2}, & \frac{1}{n-1} \text{sp}A_{n-1} &= p_{n-1}, & B_{n-1} &= A_{n-1} - p_{n-1} E. \\
\text{Шаг } n. A_n &= AB_{n-1}, & \frac{1}{n} \text{sp}A_n &= p_n, & B_n &= A_n - p_n E,
\end{aligned} \tag{3}$$

где sp - след соответствующей матрицы, а E - единичная матрица порядка n , причем $B_n \equiv [0]$, что является очень удобным контрольным условием правильности проведенных вычислений.

Кроме того, если $\det A \neq 0$, то обратная матрица имеет вид

$$A^{-1} = \frac{1}{p_n} B_{n-1}, \tag{4}$$

а собственные векторы $X^{(i)}, i = \overline{1, n}$, матрицы A определяются в соответствии с рекуррентными соотношениями

$$X_q^{(i)} = \lambda_i X_{q-1}^{(i)} + b_q^{(i)}, X_0^{(i)} = e^{(i)}, q = \overline{1, n-1}, i = \overline{1, n} \tag{5}$$

на $n-1$ -ом шаге, где $e^{(i)}$ - i -й столбец единичной матрицы, а $b_q^{(i)}$ - i -й столбец матрицы B_q .

Теперь, имея в виду неавтономную матрицу $A(t) = (a_{ij}(t)), i, j = \overline{1, n}$, с элементами бесконечной гладкости и ДТ-преобразования (1), для цепочки последовательностей (3) представим следующий аналог метода Фаддеева при $K = \overline{0, \infty}$:

$$\begin{cases}
A_1(K) = A(K), & P_1(K) = \text{sp}A_1(K), & B_1(K) = A_1(K) - P_1(K)E, \\
A_2(K) = A(K) * B_1(K) = \sum_{l=0}^K A(l) * B_1(K-l), & P_2(K) = \frac{1}{2} \text{sp}A_2(K), & B_2(K) = A_2(K) - P_2(K)E, \\
\vdots & \vdots & \vdots \\
A_{n-1}(K) = A(K) * B_{n-2}(K) = \sum_{l=0}^K A(l) * B_{n-2}(K-l), & P_{n-1}(K) = \frac{1}{n-1} \text{sp}A_{n-1}(K), & B_{n-1}(K) = A_{n-1}(K) - P_{n-1}(K)E, \\
A_n(K) = A(K) * B_{n-1}(K) = \sum_{l=0}^K A(l) * B_{n-1}(K-l), & P_n(K) = \frac{1}{n} \text{sp}A_n(K), & B_n(K) = A_n(K) - P_n(K)E,
\end{cases} \tag{6}$$

где $*$ - знак дифференциальной свертки, причем $B_n(K) \equiv [0], \forall K = \overline{0, \infty}$ (последние также являются очень удобными контрольными условиями правильности проведенных вычислений).

Аналогично, для определения векторов дискрет $X_q^{(i)}(K)$ собственных векторов $X_q^{(i)}(t)$ матрицы $A(t)$ в соответствии с (5) получим

$$X_q^{(i)}(K) = \lambda_i(K) * X_{q-1}^{(i)}(K) + b_q^{(i)}(K) =$$

$$= \sum_{l=0}^K \lambda_i(l) X_{q-1}^{(i)}(K-l) + b_q^{(i)}(K), \quad X_0^{(i)} = e^{(i)}, \quad q = \overline{1, n-1}, \quad i = \overline{1, n}. \quad (7)$$

При соотношениях (6), (7), а также с учетом (1) и (4) будем иметь:

- для коэффициентов $p_i(t), i = \overline{1, n}$, собственного многочлена:

$$p_i(t) = \sum_{K=0}^{\infty} \left(\frac{t-t_v}{H} \right)^K P_i(K), \quad i = \overline{1, n}; \quad (8)$$

- для матрицы $B_{n-1}(t)$:

$$B_{n-1}(t) = \sum_{K=0}^{\infty} \left(\frac{t-t_v}{H} \right)^K B_{n-1}(K) \quad (9)$$

и, следовательно,

$$A^{-1}(t) = \frac{1}{p_n(t)} B_{n-1}(t); \quad (10)$$

- для собственных векторов:

$$X_q^{(i)}(t) = \sum_{K=0}^{\infty} \left(\frac{t-t_v}{H} \right)^K X_q^{(i)}(K), \quad i = \overline{1, n}. \quad (11)$$

Пример (см. [6]) (случай кратных собственных значений с кратными начальными дискретами). Рассмотрим матрицу

$$A(t) = \begin{bmatrix} 1-2t & 0 & 0 \\ t^3 & 1-2t & t \\ t^2 & 0 & 1+t^2 \end{bmatrix},$$

для которой собственный многочлен равен

$$P(\lambda(t)) = \lambda^3(t) - p_1(t) \cdot \lambda^2(t) - p_2(t) \cdot \lambda(t) - p_3(t) =$$

$$= \lambda^3(t) - (3-4t+t^2)\lambda^2(t) - (-3+8t-6t^2+4t^3)\lambda(t) - (1-4t+5t^2-4t^3+4t^4) = 0,$$

откуда его коэффициенты: $p_1(t) = 3-4t+t^2$, $p_2(t) = -3+8t-6t^2+4t^3$, $p_3(t) = 1-4t+5t^2-4t^3+4t^4$. Кроме того [6], собственные значения равны $\lambda_1(t) = 1-2t$, $\lambda_2(t) = 1-2t$ и $\lambda_3(t) = 1+t^2$, следовательно, при ДТ-преобразованиях (с центром аппроксимации $t_v = 1$) имеем: $\lambda_1(0) = -1$, $\lambda_2(0) = -1$, $\lambda_3(0) = 2$, а также

$$A(0) = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 1 \\ 1 & 0 & 2 \end{bmatrix}, A(1) = H \begin{bmatrix} -2 & 0 & 0 \\ 3 & -2 & 1 \\ 2 & 0 & 2 \end{bmatrix}, A(2) = H^2 \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 3 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 2 \end{bmatrix}, A(3) = H^3 \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$A(K) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \forall K \geq 3.$$

Определение собственного многочлена. Имея в виду (6), получим:

Шаг 1

- при $K = 0$:

$$A_1(0) = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 1 \\ 1 & 0 & 2 \end{bmatrix}, P_1(0) = 0, B_1(0) = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 1 \\ 1 & 0 & 2 \end{bmatrix};$$

- при $K = 1$:

$$A_1(1) = H \begin{bmatrix} -2 & 0 & 0 \\ 3 & -2 & 1 \\ 2 & 0 & 2 \end{bmatrix}, P_1(1) = -2H, B_1(1) = H \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 3 & 0 & 1 \\ 2 & 0 & 4 \end{bmatrix};$$

- при $K = 2$:

$$A_1(2) = H^2 \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 3 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}, P_1(2) = H^2, B_1(2) = H^2 \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 3 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

- при $K = 3$:

$$A_1(3) = H^3 \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, P_1(3) = 0, B_1(3) = H^3 \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

- при $K \geq 4$:

$$A_1(K) = H^K \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, P_1(K) = 0, B_1(K) = H^K \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Следовательно, для коэффициента $p_1(t)$ имеем

$$p_1(t) = \sum_{K=0}^3 \left(\frac{t-1}{H} \right)^K \cdot P_1(K) = 0 - 2H \frac{t-1}{H} + \frac{(t-1)^2}{H^2} H^2 = 3 - 4t + t^2.$$

Шаг 2

- при $K = 0$:

$$A_2(0) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 4 \end{bmatrix}, P_2(0) = 3, B_2(0) = \begin{bmatrix} -2 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

- при $K = 1$:

$$A_2(1) = H \begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 \\ -5 & 2 & 3 \\ 4 & 0 & 12 \end{bmatrix}, P_2(1) = 8H, B_2(1) = H \begin{bmatrix} -6 & 0 & 0 \\ -5 & -6 & 3 \\ 4 & 0 & 4 \end{bmatrix};$$

- при $K = 2$:

$$A_2(2)=H^2 \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ -10 & 1 & 2 \\ 5 & 0 & 10 \end{bmatrix}, P_2(2)=6H^2, B_2(2)=H^2 \begin{bmatrix} -5 & 0 & 0 \\ -10 & -5 & 2 \\ 5 & 0 & 4 \end{bmatrix};$$

- при $K=3$:

$$A_2(3)=H^3 \begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 \\ -10 & 2 & 0 \\ 2 & 0 & 4 \end{bmatrix}, P_2(3)=4H^3, B_2(3)=H^3 \begin{bmatrix} -2 & 0 & 0 \\ -10 & -2 & 0 \\ 2 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

- при $K=4$:

$$A_2(4)=H^4 \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, P_2(4)=0, B_2(4)=H^4 \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -5 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

- при $K=5$:

$$A_2(5)=H^5 \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, P_2(5)=0, B_2(5)=H^5 \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

- при $K \geq 6$:

$$A_2(K)=H^K \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, P_2(K)=0, B_2(K)=H^K \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Следовательно, для коэффициента $p_2(t)$ имеем

$$p_2(t) = \sum_{K=0}^3 \left(\frac{t-1}{H} \right)^K \cdot P_2(K) = 3 + 8H \frac{t-1}{H} + 6H^2 \frac{(t-1)^2}{H^2} + 4H^3 \frac{(t-1)^3}{H^3} = \\ = -5 + 6t - 3t^2 + 2t^3.$$

Шаг 3

- при $K=0$:

$$A_3(0) = \begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{bmatrix}, P_3(0) = 2, B_3(0) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

- при $K=1$:

$$A_3(1) = H \begin{bmatrix} 10 & 0 & 0 \\ 0 & 10 & 0 \\ 0 & 0 & 10 \end{bmatrix}, P_3(1) = 10H, B_3(1) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

- при $K=2$:

$$A_3(2) = H^2 \begin{bmatrix} 17 & 0 & 0 \\ 0 & 17 & 0 \\ 0 & 0 & 17 \end{bmatrix}, P_3(2) = 17H^2, B_3(2) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

- при $K = 3$:

$$A_3(3) = H^3 \begin{bmatrix} 12 & 0 & 0 \\ 0 & 12 & 0 \\ 0 & 0 & 12 \end{bmatrix}, P_3(3) = 12H^3, B_3(3) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

- при $K = 4$:

$$A_3(4) = H^4 \begin{bmatrix} 4 & 0 & 0 \\ 0 & 4 & 0 \\ 0 & 0 & 4 \end{bmatrix}, P_2(4) = 4H^4, B_2(4) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

- при $K \geq 5$:

$$A_3(K) = H^K \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, P_3(K) = 0, B_3(K) = H^K \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Следовательно, для коэффициента $p_3(t)$ имеем

$$p_3(t) = \sum_{K=0}^4 \left(\frac{t-1}{H} \right)^K P_3(K) = 2 + 10H \frac{t-1}{H} + 17H^2 \frac{(t-1)^2}{H^2} + 12H^3 \frac{(t-1)^3}{H^3} + 4H^4 \frac{(t-1)^4}{H^4} = 1 - 4t + 5t^2 - 4t^3 + 4t^4.$$

И, наконец, для собственного многочлена получим

$$\begin{aligned} P(\lambda(t)) &= \lambda^3(t) - p_1(t) \cdot \lambda^2(t) - p_2(t) \cdot \lambda(t) - p_3(t) = \\ &= \lambda^3(t) - (3 - 4t + t^2) \lambda^2(t) - (-3 + 8t - 6t^2 + 4t^3) \lambda(t) - (1 - 4t + 5t^2 - 4t^3 + 4t^4) = 0, \end{aligned}$$

что полностью совпадает с вышеприведенным соотношением.

Определение обратной матрицы. Имея в виду (9), получим

$$B_2(t) = \begin{bmatrix} 1 - 2t + t^2 - 2t^3 & 0 & 0 \\ -t^5 & 1 - 2t + t^2 - 2t^3 & -t + 2t^2 \\ -t^2 + 2t^3 & 0 & 1 - 4t + 4t^2 \end{bmatrix}.$$

Следовательно, в соответствии с (10) имеем

$$A^{-1}(t) = \frac{1}{1 - 4t + 5t^2 - 4t^3 + 4t^4} \begin{bmatrix} 1 - 2t + t^2 - 2t^3 & 0 & 0 \\ -t^5 & 1 - 2t + t^2 - 2t^3 & -t + 2t^2 \\ -t^2 + 2t^3 & 0 & 1 - 4t + 4t^2 \end{bmatrix},$$

что и должно быть.

Определение собственных векторов.

Для собственных значений $\lambda_1(t) = \lambda_2(t) = 1 - 2t$ имеем: $\lambda_1(0) = \lambda_2(0) = -1$; $\lambda_1(1) = \lambda_2(1) = -2H$; $\lambda_1(K) = \lambda_2(K) = 0, \forall K \geq 2$. Для собственного значения $\lambda_3(t) = 2 + t^2$ имеем: $\lambda_3(0) = 2$; $\lambda_3(1) = 0$; $\lambda_3(2) = 2$; $\lambda_3(K) = 0, \forall K \geq 3$.

Имея в виду (7), получим:

для i=1:

- при q=1:

$$X_1^{(1)}(0) = \begin{pmatrix} -2 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}, X_1^{(1)}(1) = H \begin{pmatrix} -2 \\ 3 \\ 2 \end{pmatrix}, X_1^{(1)}(2) = H^2 \begin{pmatrix} -1 \\ 3 \\ 1 \end{pmatrix},$$
$$X_1^{(1)}(3) = H^3 \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, X_1^{(1)}(K) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \forall K \geq 4;$$

- при q=2:

$$X_2^{(1)}(0) = \begin{pmatrix} 0 \\ -2 \\ 0 \end{pmatrix}, X_2^{(1)}(1) = H \begin{pmatrix} 0 \\ -10 \\ 0 \end{pmatrix}, X_2^{(1)}(2) = H^2 \begin{pmatrix} 0 \\ -19 \\ 0 \end{pmatrix}, X_2^{(1)}(3) = H^3 \begin{pmatrix} 0 \\ -16 \\ 0 \end{pmatrix},$$
$$X_2^{(1)}(4) = H^3 \begin{pmatrix} 0 \\ -7 \\ 0 \end{pmatrix}, X_2^{(1)}(5) = H^5 \begin{pmatrix} 0 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix}, X_2^{(1)}(K) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \forall K \geq 6,$$

следовательно,

$$X^{(1)}(t) = \begin{pmatrix} 0 \\ -1 + 3t - 3t^2 + 2t^3 - 2t^4 - t^5 \\ 0 \end{pmatrix}$$

(ввиду совпадения собственных чисел $\lambda_1(t)$ и $\lambda_2(t)$ здесь можно принять также, что $X^{(2)}(t) \equiv X^{(1)}(t)$);

для i=2:

- при q=1:

$$X_1^{(2)}(0) = \begin{pmatrix} 0 \\ -2 \\ 0 \end{pmatrix}, X_1^{(2)}(1) = \begin{pmatrix} 0 \\ -2 \\ 0 \end{pmatrix}, X_1^{(2)}(2) = H^2 \begin{pmatrix} 0 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix}, X_1^{(2)}(K) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \forall K \geq 3;$$

- при q=2:

$$X_2^{(2)}(K) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \forall K \geq 0,$$

следовательно,

$$X^{(2)}(t) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

(заметим, что здесь получено тривиальное решение задачи, что, в принципе, также имеет право на существование);

для i=3:

- при q=1:

$$X_1^{(3)}(0) = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 4 \end{pmatrix}, X_1^{(3)}(1) = H^2 \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 6 \end{pmatrix}, X_1^{(3)}(2) = H^2 \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, X_1^{(3)}(K) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \forall K \geq 3;$$

- при q=2:

$$X_2^{(3)}(0) = \begin{pmatrix} 0 \\ 3 \\ 9 \end{pmatrix}, X_2^{(3)}(1) = H \begin{pmatrix} 0 \\ 7 \\ 24 \end{pmatrix}, X_2^{(3)}(2) = H^2 \begin{pmatrix} 0 \\ 5 \\ 22 \end{pmatrix}, X_2^{(3)}(3) = H^3 \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 8 \end{pmatrix};$$

$$X_2^{(3)}(4) = H^4 \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, X_2^{(3)}(K) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \forall K \geq 5,$$

следовательно,

$$X^{(3)}(t) = \begin{pmatrix} 0 \\ 2t^2 + t^3 \\ 4t^2 + 4t^3 + t^4 \end{pmatrix} = t^2(t+2) \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ t+2 \end{pmatrix}.$$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Пухов Г.Е.** Дифференциальные преобразования функций и уравнений. - Киев: Наукова думка, 1984. - 420 с.
2. **Симонян С.О., Аветисян А.Г.** Вычисление определителей неавтономных матриц на основе ДТ-формализма //Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. -1999. – Т. 52, N 1. - С. 88-94.
3. **Симонян С.О., Гукасян П.Э.** Расщепление линейных динамических систем на основе дифференциально-тейлоровских преобразований //Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. -1998. – Т. 51, N 3. - С. 338-341.
Симонян С.О. К упрощению вычислительных процедур расщепления линейных динамических систем на основе дифференциально-тейлоровских преобразований // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. -2000. – Т. 53, N 3. - С. 389-393.
4. **Аветисян А.Г.** Аналог метода Леверье для неавтономных матриц //Моделирование, оптимизация, управление.-2003. Вып. 6, N 1. - С. 5-9.

5. **Симонян С.О., Аветисян А.Г.** Решение полной проблемы собственных значений неавтономных матриц //Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. -2002. – Т. 54, N 3. – С. 426-434.
6. **Крылов В.И., Бобков В.В., Монастырный П.И.** Вычислительные методы высшей математики. - Минск: Высшэйшая школа, 1972. Т. 1. -584 с.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 10.10.2003.

Ա.Գ. ԱՎԵՏԻՍՅԱՆ, Ս.Հ. ՍԻՄՈՆՅԱՆ, Գ.Ա. ԲԱԴԱԼՅԱՆ

**ՖԱԴԴԵԵՎԻ ՄԵԹՈԴԻ ՆՄԱՆԱԿԵՐՊԸ ՈՉ ԱՎՏՈՆՈՄ
ՄԱՏՐԻՑՆԵՐԻ ՀԱՄԱՐ**

Առաջարկված է ոչ ավտոնոմ մատրիցների մի քանի ինվարիանտների միաժամանակյա որոշման բավականաչափ պարզ և արդյունավետ մեթոդ:

A.G. AVETISYAN, S.H. SIMONYAN, G.A. BADALYAN

**FADDEEV METHOD ANALOGUE FOR
NON-AUTONOMOUS MATRIXES**

A simple and effective method is suggested for simultaneous solution of some invariants of non-autonomous matrix.

Վ.Շ. ՄԵԼԻՔՅԱՆ, Է.Է. ՄԿՐՏՉՅԱՆ, Կ.Գ. ՄԿՐՏՉՅԱՆ, Դ.Դ. ՀՈՎՀԱՆՆԻՍՅԱՆ, Վ.Ս. ՍՈՂՈՄՈՆՅԱՆ

ԷԼԵԿՏՐՈՆԱՅԻՆ ՍԽԵՄԱՆԵՐԻ ՏԱՐԱՆՁԱՏՄԱՆ ՄԵԹՈԴ

Առաջարկված է էլեկտրոնային սխեմաների կառուցվածքային տարանջատման մոտեցում, որը հնարավորություն է ընձեռում հաշվի առնել խառը էլեկտրատրամաբանական մոդելավորման պահանջները: Մշակված մեթոդն ունի օգտագործողի պահանջներին հարմարվելու հատկություն: Այն թույլ է տալիս ժամանակի յուրաքանչյուր պահին հաշվարկել սխեմայի անցողիկ պրոցեսները միայն նրա ակտիվ մասերի համար: Մեթոդն ապահովում է հաշվարկների համար անհրաժեշտ մեքենայական ժամանակի և հիշողության տնտեսում:

Առանցքային բառեր. էլեկտրոնային սխեմա, էլեկտրատրամաբանական մոդելավորում, կառուցվածքային տարանջատում, տեղեկատվական գրաֆ:

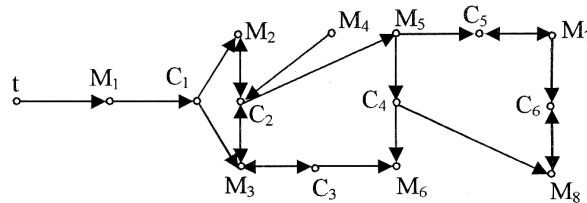
Կառուցվածքային տարանջատման եղանակն առաջարկվել է [1-3] աշխատանքներում: Ստորև առաջարկվում է այդ խնդրի լուծման ավելի ընդհանուր և ձևայնացված մոտեցում, որը, ի տարբերություն հիշատակված աշխատանքների, թույլ է տալիս բացի էլեկտրականներից, հաշվի առնել նաև բոլոր տեսակի կապերը մոդելների միջև և խառը մոդելավորման [4-6] պահանջները, հարմարեցնել հաշվարկը օգտագործողի պահանջներին, ինչպես նաև լավարկել հիշողության ծախսերը:

Կառուցվածքային տարանջատումը հիմնված է հաշվարկի գործընթացում մոդելների միջև շրջանառող տեղեկատվության հոսքերի ուղղությունների վերլուծության վրա: Հետևաբար՝ կարելի է ինտերֆեյսները չառանձնացնել որպես վերլուծվող կառուցվածքի ինքնուրույն մասեր՝ ենթադրելով, որ դրանք ներկառուցված են համապատասխան մոդելների մեջ: Այդ դեպքում հաշվարկվող սխեման բաղկացած կլինի M_i մոդելներից և կապի C_R հավասարումներից (M_i -ի տակ կարող է հասկացվել և՛ կամայական մակարդակի տարրի մոդելը, և՛ մոդելների կամայական համախումբը՝ ենթասխեման):

M_i մոդելում C_R հավասարումներից ստացվում է տեղեկատվություն: Բացի դրանից՝ M_i -ն կարող է բացահայտ ձևով կախված լինել t ժամանակից, եթե դրանից կախված են M_i -ի պարամետրերը: Ընդհանուր դեպքում M_i -ի պարամետրերը կախված են մի շարք գործոններից՝ ջերմաստիճանից, ճառագայթման հոսքից և այլն: Եթե այդ գործոնները հաստատուն են, չեն ազդում սխեմայի տեղեկատվական հոսքերի վրա, իսկ եթե կախված են ժամանակից կամ սխեմայի վիճակից, այդ կախվածությունն արտացոլվում է այդ գործոնների արժեքները հաշվարկող համապատասխան C_R հավակարգով: Այնուհետև այդ կախվածությունը որոշող C_K կապի հավասարումների միջոցով դրանք փոխանցվում են այլ M_i -ներ, որոնց պարամետրերը կախված են տվյալ գործոններից: Այսպիսով՝ C_K -երը վերաբերում են ոչ միայն M_i -ի էլեկտրական հանգույցներին, այլև արտացոլում են մոդելների միջև տեղեկատվական կապի մյուս տեսակները:

M_i -երի և C_k -երի միջև տեղեկատվության փոխանակումը կարող է փոխադարձ լինել: Օրինակ՝ հանգուցային պոտենցիալների մեթոդով ձևավորվող կապի հավասարումներում C_k -ից M_i փոխանցվում են հանգույցների պոտենցիալների արժեքները, իսկ M_i -ից C_k ՝ մոդելի բևեռների հոսանքները և հաղորդականությունների մատրիցը: Սակայն բազմամակարդականի խառը մոդելավորումը [4-6] հաճախ հանգեցնում է տեղեկատվության միակողմանի փոխանցմանը: Էլեկտրական մոդելներում դա կապված է հոսանքի և լարման աղբյուրների հետ: Որպես կանոն, միակողմանի են նաև մոդելների ֆունկցիոնալ և բազմաթիվ այլ կապեր:

Մոդելների միջև տեղեկատվական հոսքերի նկարագրման համար օգտագործվում է սխեմայի տեղեկատվական գրաֆը (ՏԳ) (նկ.1), որի գագաթներն են M_i -ն, C_k -ն և ժամանակն արտահայտող t գագաթը: Գրաֆի ճյուղերը մատնանշում են տեղեկատվության փոխանցման ուղղությունները: Բարդ կառուցվածք ունեցող M_i -ն կարող է ներառվել ՏԳ-ի մեջ՝ որպես ենթագրաֆ: Նախ դիտարկենք այն դեպքը, երբ յուրաքանչյուր M_i -ն կարելի է ներկայացնել ՏԳ-ի միայն մեկ գագաթով (հետագայում պարզ կդառնա, որ դա կարելի է անել, եթե M_i -ի բևեռները տեղեկատվորեն կապված են միմյանց հետ):



Նկ. 1. Տեղեկատվական գրաֆի օրինակ

Տեղեկատվական գրաֆին կարելի է համապատասխանեցնել տեղեկատվական I մատրիցը, որն արտահայտում է հարևան գագաթների միջև տեղեկատվության անմիջական փոխանցումը: I -ի տողերի և սյուների քանակը համապատասխանում է ՏԳ-ի գագաթների քանակին: I_{ii} անկյունագծային տարրերը հավասար են ժամանակի որոշակի t պահին M_i վիճակի վերաբերյալ տեղեկատվության ծավալին, որը չափվում է հիշողության բջիջների այն քանակով, որն անհրաժեշտ է հիշել, որպեսզի տվյալ գագաթի հաշվարկն ընդհատելուց հետո հնարավոր լինի վերսկսել այն: Սովորաբար I_{ii} -ն հավասար է գագաթի վիճակը բնութագրող ներքին փոփոխականների թվաքանակին՝ գումարած լրացուցիչ տվյալների որոշակի քանակություն: Մասնավոր դեպքում կարող է պատահել, որ $I_{ii}=0$: Բայց I մատրիցի կառուցվածքի տեսանկյունից, բոլոր անկյունագծային տարրերը կենթադրվեն կառուցվածքայնորեն ոչ գրոյական՝ անկախ դրանց թվային արժեքից:

I_{ij} ոչ անկյունագծային տարրը կենթադրվի կառուցվածքայնորեն ոչ գրոյական, եթե ՏԳ-ում կա j գագաթից i գագաթ ուղղված ճյուղ: I_{ij} -ի արժեքը հավասար է ժամանակի որևէ t պահին j գագաթի վերաբերյալ տեղեկատվության քանակին, որը պետք է ունենալ i գագաթի հաշվարկի համար՝ պայմանով, որ j գագաթն արդեն հաշվարկված է: Օրինակ՝ հանգուցային պոտենցիալների եղանակով կապի հավասարումների հաշվարկի ժամանակ $C_j \rightarrow M_i$ փոխանցման համար I_{ij} -ն հավասար է M_i -ի վրա անմիջականորեն ազդող հավասարումների համակարգի C_j

հանգուցային պոտենցիալների քանակին: Իսկ $M_j \rightarrow C_i$ փոխանցման համար I_{ij} -ն հավասար է C_i -ի վրա ազդող M_j -ի բևեռային հոսանքների քանակին: Պետք է նշել, որ վերջին դեպքում I_{ij} -ում հաշվի չի առնվում M_j մոդելի Յակոբյան մատրիցի տարրերի քանակը, քանի որ Յակոբի մատրիցը պետք է միայն M_j -ի և C_k -ի համատեղ հաշվարկի ժամանակ: Իսկ տվյալ դեպքում բերված I_{ij} -ի շնորհիվ պետք է ենթադրել, որ M_j -ն արդեն հաշվարկված է և դրա բևեռային հոսանքները հայտնի են:

Եթե I մատրիցում սկզբից տեղադրենք t գազաթը, իսկ այնուհետև M_i -ն և C_k -ն, ապա այն կունենա հետևյալ տեսքը՝

$$I = M_i \begin{bmatrix} t & M_i & C_K \\ t & 1 & 0 & 0 \\ M_t & M_M & M_C \\ C_K & 0 & C_M & C_C \end{bmatrix}, \quad (1)$$

որտեղ M_M -ը և C_C -ն անկյունագծային մատրիցներ են, M_t -ն՝ վեկտոր, որի ոչ զրոյական բաղադրիչները նշում են ժամանակից բացահայտ ձևով կախված պարամետրեր ունեցող մոդելները, C_M մատրիցն արտացոլում է տեղեկատվության փոխանցումը M_i -ից C_k , M_C մատրիցը՝ փոխանցումը C_k -ից M_i : Բերված օրինակի (նկ. 1) համար C_M -ն և M_C -ն ցույց են տրված նկ. 2-ում:

$$C_M = \begin{bmatrix} M_1 & M_2 & M_3 & M_4 & M_5 & M_6 & M_7 & M_8 \\ C_1 & I_{C_1 M_1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ C_2 & 0 & I_{C_2 M_2} & I_{C_2 M_3} & I_{C_2 M_4} & 0 & 0 & 0 \\ C_3 & 0 & 0 & I_{C_3 M_3} & 0 & 0 & I_{C_3 M_6} & 0 \\ C_4 & 0 & 0 & 0 & 0 & I_{C_4 M_5} & I_{C_4 M_6} & 0 \\ C_5 & 0 & 0 & 0 & 0 & I_{C_5 M_5} & 0 & I_{C_5 M_7} \\ C_6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I_{C_6 M_7} & I_{C_6 M_8} \end{bmatrix}$$

$$M_C = \begin{bmatrix} C_1 & C_2 & C_3 & C_4 & C_5 & C_6 \\ M_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ M_2 & I_{M_2 C_1} & I_{M_2 C_2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ M_3 & I_{M_3 C_1} & I_{M_3 C_2} & I_{M_3 C_3} & 0 & 0 & 0 \\ M_4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ M_5 & 0 & I_{M_5 C_2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ M_6 & 0 & 0 & 0 & I_{M_6 C_4} & 0 & 0 \\ M_7 & 0 & 0 & 0 & 0 & I_{M_7 C_5} & 0 \\ M_8 & 0 & 0 & 0 & I_{M_8 C_4} & 0 & I_{M_8 C_6} \end{bmatrix}$$

Նկ. 2. C_M և M_C մատրիցները (նկ. 1-ի SQ-ի համար)

I մատրիցի յուրաքանչյուր i -րդ տող իր ոչ զրոյական ոչ անկյունագծային տարրերով ($\Omega \Omega US$) ցույց է տալիս, թե որ գազաթներից է տեղեկատվությունն անմիջապես փոխանցվում i -րդ գազաթ, իսկ j -րդ սյունը՝ որ տեղեկատվությունը հարևան գազաթներ է փոխանցվում j գազաթից:

I մատրիցը կապված է այլ մատրիցների հետ, որոնք հաճախ օգտագործվում են սխեմաների հաշվարկի համար: Այսպես, օրինակ, $C = C_M M_C$ մատրիցն իր $\Omega \Omega US$ -

երով արտացոլում է կապի հավասարումների համակարգի մատրիցի ոչ զրոյական տարրերի կառուցվածքը (առանց հաշվի առնելու LU-բաղադրման պրոցեսում առաջացող՝ նոր ոչ զրոյական տարրերը): Այսինքն՝ C-ն լավարկված կարգավորման ավգորիթմների աշխատանքի համար սովորաբար ելակետային մատրից է:

Կառուցվածքային տարանջատումն իրականացնելու համար անհրաժեշտ է SQ-ում բացահայտել հետադարձ կապով ընդգրկված փոխկապակցված գազաթների համակարգերը: Այդպիսի գազաթների հավասարումները պետք է լուծվեն միասին, այսինքն՝ կազմեն հավասարումների ընդհանուր համակարգի ենթահամակարգերը: Դրանց կարելի է առանձնացնել՝ կառուցելով կրճատված տեղեկատվական գրաֆ (ԿՏԳ), որի գազաթներին համապատասխանում է սկզբնական SQ-ի հետադարձ կապեր ունեցող գազաթների բազմությունը:

ԿՏԳ-ի և SQ-ի գազաթների միջև համապատասխանությունը կարելի է արտացոլել S մատրիցում, որի տողերի քանակը հավասար է ԿՏԳ-ի գազաթների քանակին, իսկ սյուների քանակը՝ SQ-ի գազաթների քանակին:

S-ի ձևավորումից հետո կարելի է ձևավորել ԿՏԳ-ի տեղեկատվական I_c մատրիցը: Դրա I_{kr}^c տարրերը որոշվում են հետևյալ կերպ. եթե SQ-ի $B_{k1}, B_{k2}, \dots$ գազաթները մտել են ԿՏԳ-ի B_k գազաթի մեջ, իսկ $B_{r1}, B_{r2}, \dots$ գազաթները մտել են B_r -ի մեջ, ապա

$$I_{kr}^c = \sum_i \sum_j I_{k_i r_j}, \quad I_{kk}^c = \sum_i I_{k_i k_i}, \quad I_{rr}^c = \sum_j I_{r_j r_j} \quad (2)$$

Գործնականորեն ավելի հարմար է ԿՏԳ-ը ձևավորել երկու փուլով: Առաջին փուլում միացվում են իրար հետ անմիջապես երկկողմանիորեն կապված SQ-ի գազաթները: Դրանք գտնվում են I-ի սիմետրիկ ՈԶՈՍՏ-երով և միացվում են I-ի տողերի և սյուների համապատասխան գումարման միջոցով: Եթե արդյունքում ստացվում են նոր սիմետրիկ ՈԶՈՍՏ-եր, ապա դրանք վերացվում են համանման ձևով: Արդյունքում ստացվում է հարևան գազաթների միջև միակողմանի կապերով մասնակի կրճատված SQ:

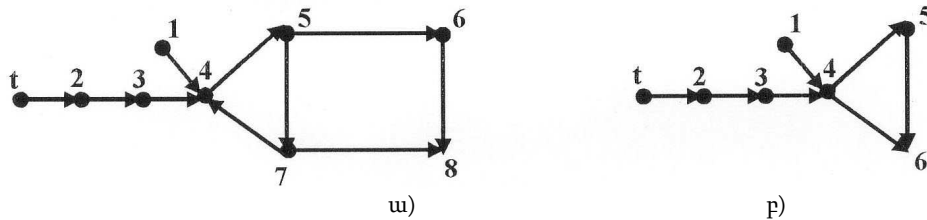
Նկ. 1-ում ցուցադրված օրինակի համար այդպիսի մասնակի կրճատված SQ-ը բերված է նկ. 3.ա-ում: Այնուհետև արդեն այդ գրաֆի համար իրականացվում է հետադարձ կապի ուրվագծերին համապատասխանող գազաթների միավորում, և վերջնականապես ձևավորվում են S և I_c մատրիցները: Նկ. 1-ում բերված օրինակի համար ԿՏԳ-ն ունի նկ. 3բ-ում բերված տեսքը, իսկ դրա մատրիցների կառուցվածքը բերված է նկ. 4-ում: Նկ. 3.ա-ից նկ. 3բ-ին անցման ժամանակ իրականացվել է հետադարձ կապով ընդգրկված 6, 8, 7 գազաթների միավորում:

Տրված օրինակում ստացվեց ստորին եռանկյունային մատրից, որովհետև ԿՏԳ-ի գազաթները համարակալված էին ըստ տեղեկատվության տարածման: Կարելի է ցույց տալ, որ տողերի և սյուների համապատասխան փոփոխությամբ I_c -ն միշտ կարելի է բերել ստորին եռանկյունային տեսքի:

ԿՏԳ-ում կարող են լինել գազաթներ, որոնց չի հասնում տեղեկատվությունը t գազաթից: Այդ դեպքում անցողիկ պրոցեսների հաշվարկի ժամանակ այդ գազաթներին համապատասխանող հավասարումները լուծել պետք չէ: Բավական է վերցնել կայուն ռեժիմում այդ հավասարումների լուծումների արդյունքները:

ԿՏԳ-երում նման գազաթներին կարող են համապատասխանել սնուցման աղբյուրների, ռեժիմային հոսանքի և լարման սխեմաները և այլն: Այդ գազաթները

ցանկալի է առանձնացնել՝ դրանց շնորհիվով t գագաթի համարին նախորդող համարներ: Դա կարելի է իրականացնել հետևյալ կերպ: Դիցուք, I_c -ն եռանկյունային տեսքի բերելուց հետո t գագաթի համարն է l : Ապա հերթականությամբ, սկսած $l+1$ -ից, դիտարկվում են I_c -ի տողերը և եթե գտնվում է այնպիսի j տող, որի համար $I_{j,l+1}^c = \dots I_{j,j-1}^c = 0$, ապա այն դրվում է t գագաթին համապատասխանող տողից առաջ: Նման փոփոխությունը չի խախտում I_c -ի ստորին եռանկյունային տեսքը:



Նկ. 3. ԿՏԳ-ի ձևավորում ըստ նկ. 1-ի ՏԳ-ի. ա) երկկողմանի կապերի սեղմում, բ) ԿՏԳ

Այսպիսով՝ նկարագրված քայլերից հետո ԿՏԳ-ի գագաթները դառնում են համարակալված այնպիսի հաջորդականությամբ, որ յուրաքանչյուր գագաթի հավասարումների ենթահամակարգի լուծումը կախված է նախորդ գագաթների հաշվարկի արդյունքներից և կախված չէ հաջորդներից: Այլ կերպ ասած՝ ստացվել է սխեմայի տարանջատում, որը թույլ է տալիս առանձնացված հատվածների միջև իրականացնել հաջորդական հաշվարկ առանց մոտարկումների: Ցույց տանք, թե ինչպես կարելի է հաշվարկների ծավալն ու հաջորդականությունը հարմարեցնել այն տեղեկատվությանը, որն օգտագործողը կցանկանար ստանալ հաշվարկի արդյունքում:

$$S = \begin{matrix} & t & M_1 & M_2 & M_3 & M_4 & M_5 & M_6 & M_7 & M_8 & C_1 & C_2 & C_3 & C_4 & C_5 & C_6 \\ \begin{matrix} t \\ 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \end{matrix} & \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \end{matrix}, \quad I_c = \begin{matrix} & 1 & t & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \\ \begin{pmatrix} 1 \\ t \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} x & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & x & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & x & x & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & x & x & 0 & 0 & 0 \\ x & 0 & 0 & x & x & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x & x & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & x & x & x \end{pmatrix} \end{matrix}$$

Նկ. 4. S և I_c մատրիցները (նկ. 3.բ-ի ԿՏԳ-ի համար)

Օգտագործողի պահանջները կարելի է ներկայացնել ՏԳ-ի լրացուցիչ գագաթի միջոցով՝ I մատրիցին աջից ավելացնելով զրոյական սյուն, իսկ ներքևից՝ M տող, որի ոչ զրոյական տարրերը հավասար են ՏԳ-ի այս կամ այն գագաթում պահանջվող տեղեկատվության ծավալին: Եթե պահանջվում է անցողիկ պրոցեսի հաշվարկ, t գագաթին վերաբերող M տողի տարրը ընդունվում է հավասար միավորի: I մատրիցին աջից նույնպես ավելացվում է զրոյական սյուն, իսկ ներքևից՝ M_c տող, որը որոշվում է հետևյալ հարաբերությամբ.

$$M_c = MS^t: \quad (3)$$

Օգտագործողի գագաթի վրա ազդեցություն չթողնող գագաթները հաշվարկելն անիմաստ է: Դրանց կարելի է տալ համարներ, որոնք գերազանցում են

օգտագործողի N_R գազաթի համարը, հետևյալ կերպ՝ N_R-1 -ից սկսած դիտարկվում են N_C տողերը՝ համարների նվազման ուղղությամբ: Եթե գտնվում է այն j գազաթը, որի համար $I_{j+1,j}^c = \dots = I_{N_R,j} = 0$, ապա դրանց շնորհիվում է օգտագործողի գազաթին հաջորդող համար, իսկ I_C -ի տողերը և պոնները համապատասխանաբար տեղափոխվում են: Վերջում N_R -ը գերազանցող համարներով գազաթները չեն դիտարկվում և մնում է արդյունաբար I_R մատրիցը, որի հիման վրա էլ պլանավորվում է հաշվարկը: Լուծման հաջորդականությունը կարող է որոշվել գազաթների համարակալման կարգով:

Դիցուք, նկ. 1-ում բերված օրինակում տվյալ պահին օգտագործողի կողմից իրականացվող հաշվարկում պահանջվում է C_1 -ից և C_2 -ից ստացվող տեղեկատվությունն անցողիկ պրոցեսների վերաբերյալ: Այդ դեպքում՝

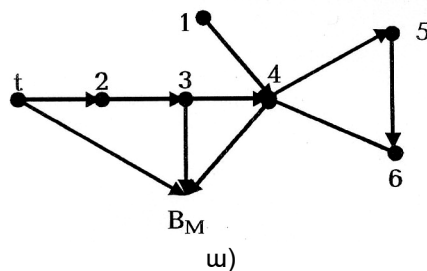
t M₁ M₂ M₃ M₄ M₅ M₆ M₇ M₈ C₁ C₂ C₃ C₄ C₅ C₆

$M = (1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ x \ 0 \ 0 \ 0 \ x \ x \ 0 \ 0 \ 0 \ 0)$,

M_c տողն ունի հետևյալ տեսքը.

1 t 2 3 4 5 6

$M_c = (0 \ 1 \ 0 \ x \ x \ 0 \ 0)$



$$I_C = \begin{matrix} & 1 & t & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & B_M \\ \begin{matrix} 1 \\ t \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \\ B_M \end{matrix} & \begin{pmatrix} x & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & x & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & x & x & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & x & x & 0 & 0 & 0 & 0 \\ x & 0 & 0 & x & x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x & x & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x & x & x & 0 \\ 0 & x & 0 & x & x & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \end{matrix}$$

$$I_C = \begin{matrix} & 1 & t & 2 & 3 & 4 & B_M & 5 & 6 \\ \begin{matrix} 1 \\ t \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ B_M \\ 5 \\ 6 \end{matrix} & \begin{pmatrix} x & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & x & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & x & x & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & x & x & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ x & 0 & 0 & x & x & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & x & 0 & x & x & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x & 0 & x & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x & 0 & x & x & 0 \end{pmatrix} \end{matrix}$$

բ)

Նկ. 5. Նկ. 3 բ-ի ԿՏԳ-ի մեջ օգտագործողի B_M գազաթի ներմուծում

ա) B_M -ով լրացված ԿՏԳ, բ) I_C մատրիցը և B_M -ի տեղափոխության արդյունքը

Նկ. 3.բ-ի ԿՏԳ-ում ավելացվում է օգտագործողի՝ նկ. 5.ա-ում պատկերված B_M գազաթը: Նկ. 5.ա-ում բերված է այդ ԿՏԳ-ի I_h մատրիցը: Տողերի վերոնկարագրյալ տեղափոխությունից հետո այն ստանում է նկ. 5.բ-ում բերված տեսքը, որտեղ նշված է արդյունաբար I_R մատրիցը:

Ստացված արդյունքը, հաշվի առնելով S մատրիցի տեսքը, կարելի է մեկնաբանել հետևյալ կերպ: M_4 մոդելը (գազաթ 1) հաշվարկվում է միայն ստատիկ ռեժիմում, և անցողիկ պրոցեսների ընթացքում դրանից ստացվող տեղեկատվությունը չի վերահաշվարկվում: Դա հետևում է այն բանից, որ 1 գազաթը նախորդում է t-ին: Անցողիկ պրոցեսների ժամանակ հաշվարկը կատարվում է հետևյալ հաջորդականությամբ՝ հաշվարկվում է M_i մոդելը (գազաթ 2), հետո լուծվում են C_i կապի հավասարումները (գազաթ 3), այնուհետև լուծվում է $M_2, M_3, M_5, M_6, C_2, C_3, C_4$ հավասարումների համակարգը (գազաթ 4): M_7, C_5 (գազաթ 5), և M_8, C_6 (գազաթ 6) հավասարումների և դրանց լուծման կարիք չկա ոչ ստատիկ և ոչ էլ անցողիկ ռեժիմների համար, քանի որ այն ոչ մի կերպ չի անդրադառնում օգտագործողի կողմից պահանջվող տեղեկատվության վրա: Ավելին՝ եթե նախագծման տվյալ փուլում կատարվում է որևէ հատվածի մշակում (օրինակ՝ 3 և 4 գազաթները պարունակող), ապա ցանկացած փոփոխությունների դեպքում անհրաժեշտություն չկա կրկին հաշվարկել դրանց տեղեկատվություն փոխանցող գազաթները (1 և 2): Բավարար է միայն հիշել առաջին հաշվարկից հետո տեղեկատվությունը և հետագայում օգտագործել այն՝ կրկնելով միայն այն գազաթների հաշվարկը, որոնցում կատարված են փոփոխությունները:

Բերված օրինակն արտացոլում է կառուցվածքային տարանջատման հաշվին ստացվող առավելություններից մի քանիսը՝

1. Կարելի է առանց ճշտության որևէ կորստի հրաժարվել սխեմայի մի մասի հաշվարկից, եթե տվյալ առաջադրանքում օգտագործողին անհրաժեշտ է տեղեկատվություն ոչ թե ամբողջ սխեմայի ելքից, այլ ինչ-որ միջանկյալ կետից:
2. Կարելի է խուսափել անցողիկ պրոցեսների հաշվարկից սխեմայի այն մասերում, որտեղ կանխավ հայտնի է դրանց բացակայությունը: Ճիշտ է, նույն բանը կարելի է անել՝ կիրառելով լատենտությունը հաշվի առնելու եղանակները, բայց դրանք պահանջում են լրացուցիչ հաշվարկներ:

Հիմնական առավելությունը, որը թույլ է տալիս հավասարումների լրիվ համակարգի լուծումը փոխարինել դրա առանձին ենթահամակարգերի հաջորդական լուծումներով, խնդրի տարանջատումն է: Յուրաքանչյուր ենթահամակարգի լուծումը կարելի է իրականացնել դրա համար առավելագույնս ընդունելի մեթոդներով, լավարկված ժամանակային քայլերով: Ակնհայտ է նաև համակարգչային հիշողության տնտեսումը, քանի որ յուրաքանչյուր ենթահամակարգի հաշվարկի համար կարելի է օգտագործել հիշողության միևնույն հատվածները: Որոշ դեպքերում մեքենայական ժամանակի և հիշողության նկատելի տնտեսումը կարող է կապված լինել նաև ԿՏԳ-ի տարբեր գազաթների մեջ մտնող հավասարումների կապն արտահայտող Յակոբիի մատրիցի տարրերը հաշվարկելու և հիշողության մեջ պահելու անհրաժեշտության վերացմամբ: Այդ պատճառով Յակոբիի մատրիցի տարրերի քանակը հաշվի չի առնվում I և I_c մատրիցների տարրերի մեջ մտնող տեղեկատվության ծավալների հաշվարկման ժամանակ:

Դիտարկված կառուցվածքային տարանջատումն ավելի արդյունավետ է, եթե օգտագործվում են շատ միակողմանի ուղղված M_i -ներ և սխեմայում բացակայում է ընդհանուր հետադարձ կապը:

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. **Stievano I.S., Canavero F.G., Maio I.A.** Parametric Macromodels of Digital I/O Ports // IEEE Trans. Advanced Packaging. - 2002. - Vol. 25, №. 2. -P. 255-264.
2. **Stievano I.S., Chen Z., Becker D., Canavero F.G., Katopis G., Maio I. A.** Macromodeling of Digital I/O Ports for System EMC Assessment // Proc. of Design, Automation and Test in Europe Conference, DATE, Paris, F. – 2002. –P. 4-8.
3. **Архангельский А. Я.** Моделирование больших электронных схем методами структурной и событийной декомпозиции. – М.: МИФИ, 1986. -24с.
4. **Архангельский А. Я., Меликян В. Ш.** Смешанное схемотехническое и функционально-логическое моделирование аналого-цифровых схем // Электронное моделирование / АН СССР. - Киев. -1984. -Т. 6. - С. 35-39.
5. **Saleh R., Antao B., Singh J.** Multilevel and Mixed-Domain Simulation of Analog Circuits and Systems // IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems. - 1996. - Vol. 15, No.1 -P. 68-81.
6. **Saleh R., Shyh-Jye Jou.** Mixed Mode Simulation and Analog Multilevel Simulation // Kluwer Academic Publishers. -1994.

Հղեց: Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 12.04.2003:

**В.Ш. МЕЛИКЯН, Э.Э. МКРТЧЯН, К.Г. МКРТЧЯН, Д.Д. ОГАНЕСЯН,
В.С. СОГОМОНЯН**

МЕТОД РАЗЪЕДИНЕНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ СХЕМ

Предлагается подход к структурной декомпозиции электронных схем, позволяющий учесть требования смешанного электро-логического моделирования. Разработанный метод имеет свойство адаптации к требованиям пользователя, позволяет рассчитывать только активные фрагменты схемы в каждый момент времени и обеспечивает экономию машинного времени и памяти, необходимых для расчетов.

**V.SH. MELIKYAN, E.E. MKRTCHYAN, K.G.MKRTCHYAN,
D.D. HOVHANNISSYAN, V.S. SOGHOMONYAN**

METHOD OF ELECTRONIC CIRCUIT DISCONNECTION

An approach to structural decomposition of electronic circuits that permits to take into account the demand for mixed electrological simulation is proposed. The method developed has a property of adoption to the user's requirements, allows to calculate only active fragments of the circuit at every moment and provides machine time and memory economy necessary for calculations.

Ф.П. ГРИГОРЯН

СИНТЕЗ УПРАВЛЕНИЯ С ЖЕЛАЕНЫМ СПЕКТРОМ В САР ПРИ КОЛИЧЕСТВЕ ВХОДОВ РЕГУЛЯТОРА $m > 1$

В САР рассмотрена задача выбора коэффициентов входного сигнала регулятора с желаемым спектром, когда количество входов регулятора больше единицы. Получена формула, выражающая зависимость между коэффициентами входного сигнала регулятора и наперед заданными желаемыми числами.

Ключевые слова: синтез управления, желаемый спектр, матрица управляемости, импульсная переходная функция, передаточная функция.

В настоящей работе рассматривается задача построения скалярного управления с желаемым спектром в стационарной системе автоматического регулирования, когда количество входов регулятора больше единицы.

Постановка задачи. Рассмотрим следующую стационарную систему:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = Ax + hu, \\ u = \int_{-\infty}^t G(t-t')v(t')dt', \\ v = Bx \end{cases} \quad (1)$$

или

$$\frac{dx}{dt} = Ax + h \int_{-\infty}^t G(t-t')Bx(t')dt', \quad (2)$$

где $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$ – столбцовая матрица размера $n \times 1$, вектор состояния процесса; $v = (v_1, v_2, \dots, v_m)^T$ – столбцовая матрица размера $m \times 1$, вектор входных сигналов регулятора; u – скалярное управляющее воздействие, рассматриваемое как выходной сигнал регулятора; $G = (g_1, g_2, \dots, g_m)$ – строчная матрица размера $1 \times m$ импульсных переходных функций регулятора;

$$A = (a_{ij}), i, j = \overline{1, n}; B = (b_{ij}), i = \overline{1, m}; j = \overline{1, n}; h = (h_1, h_2, \dots, h_n)^T.$$

Требуется построить матрицу B так, чтобы решение системы (1) или (2) имело вид

$$x = \tilde{K}y = \sum_{i=1}^n \tilde{K}_i y_i, \quad (3)$$

$$\frac{dy_i}{dt} = \lambda_i y_i, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (4)$$

где $\tilde{K} = (\tilde{K}_1, \tilde{K}_2, \dots, \tilde{K}_n)$ – некоторая невырожденная матрица, подлежащая определению; $\lambda_i, i = \overline{1, n}$ – наперед заданные желаемые числа, удовлетворяющие условиям

1. $\lambda_i \neq \lambda_j, i \neq j, i, j = 1, 2, \dots, n$.
2. Для $W(\lambda) = [W_1(\lambda), W_2(\lambda), \dots, W_m(\lambda)]$ передаточной функции регулятора имеем $W_k(\lambda_i) \neq 0, k = 1, 2, \dots, m; i = 1, 2, \dots, n$.
3. $\lambda_i (i = \overline{1, n})$ не равны хотя бы одному из собственных чисел матрицы A .

Решение. Выполним в системе (2) преобразование

$$x = Sz, \quad (6)$$

получим [4]

$$\frac{dz}{dt} = A_0 z + h_0 \int_{-\infty}^t G(t-t') qz(t') dt', \quad (7)$$

где $S = (h, Ah, \dots, A^{n-1}h)$ – матрица управляемости,

$$4. \quad A_0 = S^{-1}AS = \begin{pmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 & -\rho_n \\ 1 & 0 & \dots & 0 & -\rho_{n-1} \\ 0 & 1 & \dots & 0 & -\rho_{n-2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 1 & -\rho_1 \end{pmatrix}, \quad h_0 = S^{-1}h = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (8)$$

$$q = BS = (q_1, q_2, \dots, q_n), \quad q_j = (q_{1j}, q_{2j}, \dots, q_{mj}), \quad j = \overline{1, n},$$

$$(\rho_n, \rho_{n-1}, \dots, \rho_1)^T = -S^{-1}A^n h, \quad A^n h = -\rho_n h - \rho_{n-1} Ah - \dots - \rho_1 A^{n-1} h.$$

Теперь сделаем в системе (7) замену переменных

$$z = Ky = \sum_{i=1}^n K_i y_i, \quad (9)$$

где $y_i (i = 1, 2, \dots, n)$ – суть решения уравнения (4),

$$y_i = c_i \exp(\lambda_i t), \quad i = \overline{1, n}; \quad (10)$$

$K = (K_1, K_2, \dots, K_n)$ – неизвестная матрица, приводящая с учетом (4) к виду

$$\sum_{i=1}^n K_i \lambda_i y_i = A_0 \sum_{i=1}^n K_i y_i + h_0 \int_{-\infty}^t G(t-t') q \sum_{i=1}^n K_i y_i(t') dt'. \quad (11)$$

После нескольких преобразований из (11) получим [1]

$$(A_0 + h_0 W(\lambda_i) q - \lambda_i E) K_i = 0, \quad i = \overline{1, n}$$

или

$$(q_{11}, q_{12}, \dots, q_{1n}) = \Delta^T [(\Lambda P)^{-1}]^T.$$

По (8) и (19) получается

$$q = \begin{pmatrix} \Delta^T [(\Lambda P)^{-1}]^T \\ c_{21} & c_{22} & \dots & c_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ c_{m1} & c_{m2} & \dots & c_{mn} \end{pmatrix}, \quad (20)$$

где c_{ij} , $i=1,2,\dots,m$; $j=1,2,\dots,n$ – произвольные постоянные.

Из (8) и (20) окончательно имеем

$$B = \begin{pmatrix} \Delta^T [(\Lambda P)^{-1}]^T \\ c_{21} & c_{22} & \dots & c_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ c_{m1} & c_{m2} & \dots & c_{mn} \end{pmatrix} S^{-1}. \quad (21)$$

Кроме того, $\tilde{K} = SK$, где столбцы матрицы $K=(K_1, K_2, \dots, K_n)$ определяются из (12). Формула (21) представляет бесконечное число видов для матрицы B .

Поэтому считаем необходимым получить решение, представленное посредством псевдообратной матрицы [3]. Для этого преобразуем систему (15).

Положим

$$\Lambda = \begin{bmatrix} \Delta^1(\lambda_1) & \Delta^2(\lambda_1) & \dots & \Delta^n(\lambda_1) & 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & \Delta^1(\lambda_2) & \Delta^2(\lambda_2) & \dots & \Delta^n(\lambda_2) & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & \Delta^1(\lambda_n) & \Delta^2(\lambda_n) & \dots & \Delta^n(\lambda_n) \end{bmatrix},$$

$$\Delta = (\Delta(\lambda_1), \Delta(\lambda_2), \dots, \Delta(\lambda_n))^T.$$

Тогда систему (15) можно записать в виде

$$\Lambda(W(\lambda_1)q_1, W(\lambda_1)q_2, \dots, W(\lambda_1)q_n; W(\lambda_2)q_1, W(\lambda_2)q_2, \dots, W(\lambda_2)q_n; \dots; \dots; W(\lambda_n)q_1, W(\lambda_n)q_2, \dots, W(\lambda_n)q_n)^T = \Delta. \quad (22)$$

Обозначим

$$W_{n^2 \times mn} = \begin{bmatrix} \text{diag}(W(\lambda_1), W(\lambda_1), \dots, W(\lambda_1)) \\ \text{diag}(W(\lambda_2), W(\lambda_2), \dots, W(\lambda_2)) \\ \dots \\ \text{diag}(W(\lambda_n), W(\lambda_n), \dots, W(\lambda_n)) \end{bmatrix}, \quad q_{mn \times 1}^- = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ \vdots \\ q_n \end{bmatrix}. \quad (23)$$

Значит, система (22) принимает вид

$$\Lambda W q^- = \Delta. \quad (24)$$

Из уравнения (24) находим

$$q^- = W^+ \Lambda^+ \Delta, \quad (25)$$

где $W^+ = (W^* W)^{-1} W^*$, $\Lambda^+ = \Lambda^* (\Lambda \Lambda^*)^{-1}$, W^+ – псевдообратная W матрица; W^* – сопряженная W матрица; Λ^+ – псевдообратная Λ матрица, Λ^* – сопряженная Λ матрица.

После некоторых преобразований получаем

$$\begin{aligned} \tilde{B} = & \left(\sum_{k=1}^n W^*(\lambda_k) \cdot W(\lambda_k) \right)^{-1} \times \\ & \times \left(\frac{W^*(\lambda_1) \Delta(\lambda_1)}{a_1}, \frac{W^*(\lambda_2) \Delta(\lambda_2)}{a_2}, \dots, \frac{W^*(\lambda_n) \Delta(\lambda_n)}{a_n} \right) \Lambda_1 S^{-1}, \end{aligned} \quad (26)$$

где

$$\Lambda_1 = \begin{pmatrix} \overline{\Delta^1(\lambda_1)} & \overline{\Delta^2(\lambda_1)} & \dots & \overline{\Delta^n(\lambda_1)} \\ \overline{\Delta^1(\lambda_2)} & \overline{\Delta^2(\lambda_2)} & \dots & \overline{\Delta^n(\lambda_2)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \overline{\Delta^1(\lambda_n)} & \overline{\Delta^2(\lambda_n)} & \dots & \overline{\Delta^n(\lambda_n)} \end{pmatrix}, \quad a_i = |\Delta^1(\lambda_i)|^2 + |\Delta^2(\lambda_i)|^2 + \dots + 1, \quad (27)$$

$i = 1, 2, \dots, n$.

Пример. Рассмотрим систему [5]

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = x_2, \\ \frac{dx_2}{dt} = -\omega^2 x_1 + \alpha u, \end{cases} \quad (28)$$

где $\omega \approx 0,0013 \text{ с}^{-1}$, $0 < \alpha \leq 1$.

Пусть

$$\begin{aligned} A = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -\omega^2 & 0 \end{pmatrix}, \quad h = \begin{pmatrix} 0 \\ \alpha \end{pmatrix}, \quad x = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix}, \quad S = (h, Ah) = \begin{pmatrix} 0 & \alpha \\ \alpha & 0 \end{pmatrix} = \alpha \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, \\ |S| = -\alpha^2 \neq 0, \quad B = \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{pmatrix}, \quad q = \begin{pmatrix} q_{11} & q_{12} \\ q_{21} & q_{22} \end{pmatrix} = BS = \\ = \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & \alpha \\ \alpha & 0 \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (29)$$

Тогда система (28) эквивалентна векторно-матричному уравнению

$$\frac{dx}{dt} = Ax + hu.$$

Требуется построить матрицу В так, чтобы решение системы (28) имело вид

$$x = \tilde{K}y = \tilde{K}_1 y_1 + \tilde{K}_2 y_2, \quad \tilde{K} = (\tilde{K}_1, \tilde{K}_2) = \begin{pmatrix} \tilde{k}_{11} & \tilde{k}_{12} \\ \tilde{k}_{21} & \tilde{k}_{22} \end{pmatrix}, \quad \frac{dy_i}{dt} = \lambda_i y_i, \quad i = 1, 2, \quad (30)$$

где λ_i , $i = 1, 2$ – желаемые числа, удовлетворяющие условиям вышеприведенной задачи.

Решение. Используем формулу (21), которая принимает следующий вид:

$$B = \begin{pmatrix} \Delta^T [(\Lambda P)^{-1}]^T \\ c_{21} & c_{22} \end{pmatrix} S^{-1}. \quad (31)$$

В силу (29) имеем

$$S^{-1} = \frac{1}{\alpha} \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, \quad A_0 = S^{-1}AS = \begin{pmatrix} 0 & -\omega^2 \\ 1 & 0 \end{pmatrix},$$

$$\Delta(\lambda_i) = |A_0 - \lambda_i E| = \begin{vmatrix} -\lambda_i & -\omega^2 \\ 1 & -\lambda_i \end{vmatrix} = \lambda_i^2 + \omega^2, \quad i = 1, 2, \quad (32)$$

$$\rho_0 = 0, \quad \rho_2 = \omega^2, \quad h_0 = S^{-1}h = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Из (18) находим

$$\Lambda = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 1 \\ \lambda_2 & 1 \end{bmatrix}, \quad P = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \Lambda P = \begin{pmatrix} \lambda_1 & 1 \\ \lambda_2 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \lambda_1 & 1 \\ \lambda_2 & 1 \end{pmatrix}, \quad \Lambda P = \Lambda$$

и, следовательно,

$$(\Lambda P)^{-1} = \Lambda^{-1} = \frac{1}{\lambda_1 - \lambda_2} \begin{pmatrix} 1 & -1 \\ -\lambda_2 & \lambda_1 \end{pmatrix},$$

$$[(\Lambda P)^{-1}]^T = \frac{1}{\lambda_1 - \lambda_2} \begin{pmatrix} 1 & -\lambda_2 \\ -1 & \lambda_1 \end{pmatrix}, \quad (33)$$

$$[(\Lambda P)^{-1}]^T S^{-1} = \frac{1}{\alpha(\lambda_1 - \lambda_2)} \begin{pmatrix} -\lambda_2 & 1 \\ \lambda_1 & -1 \end{pmatrix}.$$

Исходя из выражений (18) и (33), получаем

$$\Delta^T = \left(\frac{\Delta(\lambda_1)}{W_1(\lambda_1)} - \frac{W_2(\lambda_1)}{W_1(\lambda_1)} \cdot (\Delta^1(\lambda_1)c_{21} + \Delta^2(\lambda_1)c_{22}); \right.$$

$$\left. \frac{\Delta(\lambda_2)}{W_1(\lambda_2)} - \frac{W_2(\lambda_2)}{W_1(\lambda_2)} \cdot (\Delta^1(\lambda_2)c_{21} + \Delta^2(\lambda_2)c_{22}) \right). \quad (34)$$

Из (33) и (34) находим

$$\begin{aligned} \Delta^T[(\Lambda P)^{-1}]^T S^{-1} &= \frac{1}{\alpha(\lambda_1 - \lambda_2)} \times \\ &\times \left(\frac{-\lambda_2 \Delta(\lambda_1)}{W_1(\lambda_1)} + \frac{\lambda_2 W_2(\lambda_1)}{W_1(\lambda_1)} (\Delta^1(\lambda_1) c_{21} + \Delta^2(\lambda_1) c_{22}) + \right. \\ &+ \frac{\lambda_1 \Delta(\lambda_2)}{W_1(\lambda_2)} - \frac{\lambda_1 W_2(\lambda_2)}{W_1(\lambda_2)} (\Delta^1(\lambda_2) c_{21} + \Delta^2(\lambda_2) c_{22}); \\ &- \frac{\Delta(\lambda_1)}{W_1(\lambda_1)} - \frac{W_2(\lambda_1)}{W_1(\lambda_1)} (\Delta^1(\lambda_1) c_{21} + \Delta^2(\lambda_1) c_{22} - \\ &\left. - \frac{\Delta(\lambda_2)}{W_1(\lambda_2)} + \frac{W_2(\lambda_2)}{W_1(\lambda_2)} (\Delta^1(\lambda_2) c_{21} + \Delta^2(\lambda_2) c_{22}) \right). \end{aligned} \quad (35)$$

Пусть

$$\begin{aligned} \Delta(\lambda) &= \lambda^2 + \rho_1 \lambda + \rho_2 = \lambda^2 + \omega^2, \quad \lambda_1 = -1, \quad W(\lambda) = (W_1(\lambda), W_2(\lambda)) = \left(\frac{1}{\lambda-1}, \frac{1}{\lambda-2} \right), \\ \Delta^1(\lambda) &= \lambda + \rho_1 = \lambda, \quad \lambda_2 = -2, \quad W(-1) = \left(-\frac{1}{2}, \frac{1}{3} \right); \quad W(-2) = \left(-\frac{1}{3}, -\frac{1}{4} \right), \quad (36) \\ \Delta^2(\lambda) &= 1. \end{aligned}$$

Из (31), (32), (35), (36) получаем

$$B = \frac{1}{\alpha} \begin{pmatrix} 10 - \frac{5}{6} c_{22} + \frac{1}{12} c_{22} & 8 - \frac{1}{6} c_{21} - \frac{7}{12} c_{22} \\ c_{22} & c_{21} \end{pmatrix}. \quad (37)$$

Теперь переходим к формуле (26), которая в данном случае принимает вид

$$\tilde{B} = \left(\sum_{k=1}^2 W^*(\lambda_k) W(\lambda_k) \right)^{-1} \left(\frac{W^*(\lambda_1) \Delta(\lambda_1)}{a_1}, \frac{W^*(\lambda_2) \Delta(\lambda_2)}{a_2} \right) \Lambda_1 S^{-1}, \quad (38)$$

где

$$\Lambda_1 = \begin{pmatrix} \overline{\Delta^1(\lambda_1)} & \overline{\Delta^2(\lambda_1)} \\ \overline{\Delta^1(\lambda_2)} & \overline{\Delta^2(\lambda_2)} \end{pmatrix}, \quad a_i = |\Delta^1(\lambda_i)|^2 + |\Delta^2(\lambda_i)|^2, \quad i = 1, 2, \quad (39)$$

$$a_1 = |\Delta^1(\lambda_1)|^2 + 1; \quad a_2 = |\Delta^1(\lambda_2)|^2 + 1.$$

После соответствующих преобразований окончательно получаем

$$\tilde{B} = \frac{4}{\alpha} \begin{pmatrix} 89 & 47 \\ 332 & -800 \end{pmatrix}. \quad (40)$$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Абгарян К.А.** Матричные и асимптотические методы в теории линейных систем. – М.: Наука, 1973. – 431 с.
2. **Гальперин Е.А.** Синтез линейных управлений в стационарной линейной системе // Изв. АН СССР. Техническая кибернетика. – 1968. - №4. – С. 130-136.
3. **Гантмахер Ф.Р.** Теория матриц. – М.: Наука, 1967. – 576 с.
4. **Зубов В.И.** Лекции по теории управления. – М.: Наука, 1967. – 596 с.
5. **Пономарев В.М.** Теория управления движением космических аппаратов. – М.: Наука, 1965. – 456 с.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 17.08.2001.

Ֆ.Պ. ԳՐԻԳՈՐՅԱՆ

ՑԱՆԿԱԼԻ ՍՊԵԿՏՐՈՎ ԿԱՌԱՎԱՐՄԱՆ ՍԻՆԹԵԶ ԱՎԶ - ՈՒՄ՝ ԿԱՐԳԱՎՈՐՉԻ ՄՈՒՏՔԵՐԻ ԹՎԻ $m > 1$ ԱՐԺԵՔԻ ԴԵՊՔՈՒՄ

Ավտոմատ կառավարման համակարգում դիտարկված է ցանկալի սպեկտրի միջոցով կարգավորչի մուտքային ազդանշանի գործակիցների ընտրության խնդիր այն դեպքի համար, երբ կարգավորչի մուտքերի թիվը մեծ է մեկից: Ստացված է բանաձև, որն արտահայտում է կարգավորչի մուտքային ազդանշանի գործակիցների և նախապես տրված ցանկալի թվերի կախվածությունը:

F.P. GRIGORYAN

CONTROL SYNTHESIS WITH DESIRABLE SPECTRUM IN REGULATING SYSTEM (RS) WHEN INPUT REGULATOR QUANTITY $m > 1$

A problem of regulator input signal coefficient choice with a desirable spectrum is considered in RS when regulator input quantity is greater than a unit. A formula expressing dependence between regulator input signal coefficients and beforehand given desirable numbers is obtained.

Т.А. ГРИГОРЯН

ОБ ОЦЕНКЕ ОБЪЕМА РАБОТЫ ИНТЕРНЕТ-СЕРВИСА ПРИ ЗАПРОСАХ К БАЗЕ ДАННЫХ

Объем работы модуля интернет-сервиса при запросах к базе данных оценивается в рамках модели $GI | G | 1 | \infty$ очереди. Для применения известных результатов модели найдена скорость сходимости накопленной работы к ее стационарной величине.

Ключевые слова: интернет-сервис, модель $GI | G | 1 | \infty$, скорость сходимости.

1. Интернет-сервис обслуживания запросов к многомерной базе данных – важная проблема в сфере управления и интерпретации многомерных данных [1-3].

Нами разработан и реализован модуль регистрации и обслуживания запросов к многомерной базе данных через интернет по заказу компании “Synergy International Systems” (8100 Boone Boulevard, Suite 230, Vienna, VA, 22182, USA).

Модуль получает запрос на языке XML [4] и помещает его в очередь. Осуществляется пакетная обработка запросов по дисциплине FIFO (first in-first out) одним процессором “Intel Pentium IV”, который формирует ответ с помощью языка MDX [3].

Основной элемент реализации заключается в оценке объема накопленной и невыполненной работы в моменты поступления запросов при обработке каждого пакета дисциплиной разделения времени процессора.

Поскольку накопленная и невыполненная работа инвариантна в классе консервативных дисциплин [5], то ее можно рассчитывать в рамках модели $GI | G | 1 | \infty$. Анализ стационарной работы осуществлен в теории очередей [6].

Однако для использования известных формул модели $GI | G | 1 | \infty$ необходимо определить скорость сходимости к стационарной работе, что и является целью настоящей работы.

2. Объект исследования. В одноканальную систему обслуживания с ожиданием в случайные моменты времени $\{t_n\}$, где $0 \leq t_1 \leq t_2 \leq \dots$, поступают одиночные вызовы. Вызовы пронумерованы в порядке поступления числами $1, 2, \dots$. Время обслуживания n -го вызова обозначим u_n , и пусть $u_n = t_n - t_{n-1}$, $t_0 = 0$. В момент $t = 0$ модель свободна от вызовов.

Последовательности $\{u_n\}$ и $\{v_n\}$ неотрицательных случайных величин (СВ) определены на одном и том же вероятностном пространстве $(\Omega, \mathfrak{F}, P)$.

Последовательности $\{u_n\}$ и $\{v_n\}$ независимы друг от друга и образуют последовательности независимых одинаково распределенных (НОР) СВ с функциями распределения (ФР) $A(t)$ и $B(t)$ на $[0, +\infty)$ соответственно.

Такую модель обозначают $G \mid G \mid 1 \mid \infty$ (см., напр. [6]).

Предполагаем $A(+0)=0$ и $B(+0)=0$.

Первое условие влечет

$$P(0 < t_1 < t_2 < \dots) = 1,$$

где P - знак вероятности.

Второе условие означает, что вероятность “мгновенного” обслуживания равна нулю.

Далее предполагаем

$$0 < \alpha_1 = Mu_1 < +\infty, \quad 0 < \beta_1 = Mv_1 < +\infty,$$

где M - знак математического ожидания.

С помощью α_1 и β_1 определяется загрузка модели $\rho_1 = \beta_1 / \alpha_1$.

Важнейшей характеристикой модели для приложений является накопленная и невыполненная работа (суммарное накопленное и невыполненное время обслуживания) $w(t)$ в момент времени t .

Эта характеристика инвариантна в классе консервативных дисциплин обслуживания. Напомним, что дисциплина обслуживания консервативна, если при ее использовании внутри модели работа не создается и не исчезает, а лишь привносится в модель извне поступлением вызовов (см. [5]).

Известно, что при $\rho_1 < 1$ и $t \rightarrow +\infty$

$$w(t) \Rightarrow w^*, \quad (1)$$

где $\Rightarrow$ - знак слабой сходимости и $W^*(x) = P(w^* < x)$, $x \geq 0$ - собственная ФР, т.е. $W^*(+\infty) = 1$. Вид ФР W^* известен в литературе (см., напр. [6, 7]).

Величина w^* называется стационарной работой. Для того чтобы использовать формулы, определяющие ФР W^* или ее моменты, необходимо иметь оценки скорости сходимости в (1).

Настоящая работа посвящена этой проблематике.

3. Основной результат. Пусть

$$Mu_1^2 < +\infty, \quad Mv_1^4 < +\infty. \quad (2)$$

Из (2) следует конечность моментов $\alpha_k = Mu_1^k$ при $k \leq 2$ и $\beta_m = Mv_1^m$ при $m \leq 4$.

Обозначим

$$A = \frac{m_4 + 12m_2^2}{\alpha_1^2(1 - \rho_1)^4}, \quad (3)$$

где моменты

$$m_k = M(v_1 - \beta_1)^k, \quad k=1-4,$$

определяются с помощью моментов β_k :

$$m_1 = m_3 = 0, \quad m_2 = \beta_2 - \beta_1^2, \quad m_4 = \beta_4 - 4\beta_3\beta_1 + 6\beta_2\beta_1^2 - 3\beta_1^4.$$

Обозначим через $w_y(t)$, $t \geq 0$, $y \geq 0$ накопленную и невыполненную работу в момент времени t при условии $w_y(0) = y$.

Для введенной выше $w(t)$ имеем $w(t) = w_y(t)$ ($y=0$ при всех $t \geq 0$).

Известно, что и для $w_y(t)$ с любым неслучайным $y > 0$ справедливо соотношение (1): при $\rho_1 < 1$ и $t \rightarrow +\infty$

$$w_y(t) \Rightarrow w^* \quad (\text{см. [6]}).$$

Теорема. Пусть $\rho_1 < 1$ и выполнены условия (2). Тогда при $x \geq \frac{\rho_1 \alpha_2}{\alpha_1}$ и $t > 0$ имеем

$$0 \leq P(w(t) < x) - P(w^* < x) \leq A/t, \quad (4)$$

а при $y > 0$, $x - y \geq \frac{\rho_1 \alpha_2}{\alpha_1}$ и $t > 0$:

$$-A \left(\frac{x - y - \frac{\rho_1 \alpha_2}{\alpha_1}}{1 - \rho_1} + t \right)^{-2} \leq P(w_y(t) < x) - P(w(t) < x) \leq 0. \quad (5)$$

Здесь константа $A > 0$ может быть выбрана из (3).

С накопленной и невыполненной к моменту t работой $w(t)$ тесно связана другая характеристика модели $G \in [G, \infty)$ - суммарный простой прибора за промежуток времени $[0, t]$, обозначаемый через $I(t)$.

При $\rho_1 < 1$ и $t \rightarrow +\infty$ имеем

$$I(t) \Rightarrow I^*,$$

где $I^*(x) = P(I^* < x)$, $x \geq 0$ - собственная ФР (см. [8]).

Заменим условия (2) на

$$Mu_1^4 < +\infty, \quad Mu_1^2 < +\infty. \quad (6)$$

Из (6) следует конечность моментов α_k при $k \leq 4$ и β_m при $m \leq 2$.

Обозначим

$$B = \frac{n_4 + 12n_2^2}{\beta_1^2(\rho_1 - 1)^4} \rho_1^4, \quad (7)$$

где моменты

$$n_k = M(u_1 - \alpha_1)^k, \quad k=1-4,$$

определяются с помощью моментов α_k :

$$n_1 = n_3 = 0, \quad n_2 = \alpha_2 - \alpha_1^2, \quad n_4 = \alpha_4 - 4\alpha_3\alpha_1 + 6\alpha_2\alpha_1^2 - 3\alpha_1^4.$$

Следствие. Пусть $\rho_1 > 1$ и выполнены условия (6). Тогда при $x \geq \frac{\beta_2}{\rho_1 \beta_1}$ и $t > 0$ имеем

$$0 \leq P(I(t) < x) - P(I^* < x) \leq \frac{B}{t}, \quad (8)$$

где константа $B > 0$ может быть выбрана из (7).

4. Доказательство теоремы. Пусть $H(t)$ - функция восстановления процесса $\{t_n\}$ (см. [9]).

При $t \geq 0$ обозначим через $N(t)$ случайное число восстановлений за $[0, t]$ процесса восстановления $\{t_n\}$, т.е. $N(t)$ есть случайное число поступивших за $[0, t]$ в модель вызовов. Тогда $H(t) = MN(t)$, $t \geq 0$.

Далее обозначим через $b(t)$, $t \geq 0$ суммарное время обслуживания поступивших за $[0, t]$ в модель вызовов.

Для $S(t) = b(t) - t$, $t \geq 0$ справедливо представление

$$S(t) = v_1 + v_2 + \dots + v_{N(t)} - t, \quad (9)$$

где $N(t)$ не зависит от последовательности $\{v_n\}$ НОР СВ.

При $t > 0$ докажем неравенство

$$M(S(t) + t - \beta_1 H(t))^4 \leq (m_4 + 12m_2^2) \left(\frac{t}{\alpha_1} + \frac{\alpha_2}{\alpha_1^2} \right)^2. \quad (10)$$

Пусть $\{\xi_n\}$ - последовательность НОР СВ, где $\xi_n = v_n - \beta_1$, $n \geq 1$.

Из представления (9) при $t > 0$ следует

$$M(S(t) + t - \beta_1 H(t))^4 = M(\xi_1 + \xi_2 + \dots + \xi_{N(t)})^4,$$

где, очевидно, $N(t)$ не зависит от $\{\xi_n\}$. Следовательно, при $t > 0$ имеем

$$\begin{aligned} M(S(t) + t - \beta_1 H(t))^4 &= \sum_{n \geq 1} P(N(t) = n) M(\xi_1 + \xi_2 + \dots + \xi_n)^4 = \\ &= m_4 \sum_{n \geq 1} n P(N(t) = n) + 6m_2^2 \sum_{n \geq 1} n(n-1) P(N(t) = n) = \\ &= (m_4 + 6m_2^2) H(t) + 6m_2^2 M(N(t))^2. \end{aligned} \quad (11)$$

Для $H(t)$, $t > 0$ имеет место неравенство Лордена [10]:

$$\frac{t}{\alpha_1} \leq H(t) \leq \frac{t}{\alpha_1} + \frac{\alpha_2}{\alpha_1^2}.$$

При $t > 0$ с помощью $H(t)$ оценивается $M(N(t))^2$:

$$M(N(t))^2 = 2H(t) * H(t) - H(t) \leq 2(H(t))^2 - H(t),$$

где $*$ - знак свертки.

Применяя неравенство Лордена к правой части (11), с учетом полученных неравенств при $t > 0$ выводим

$$\begin{aligned}
M(S(t) + t - \beta_1 H(t))^4 &\leq m_4 H(t) + 12m_2^2 (H(t))^2 \leq \\
&\leq (m_4 + 12m_2^2) \left(\frac{t}{\alpha_1} + \frac{\alpha_2}{\alpha_1^2} \right)^2.
\end{aligned} \tag{12}$$

При выводе (12) также принято во внимание неравенство моментов

$$\alpha_2 \geq \alpha_1^2$$

и вытекающее из него неравенство

$$\frac{t}{\alpha_1} + \frac{\alpha_2}{\alpha_1^2} \leq \left(\frac{t}{\alpha_1} + \frac{\alpha_2}{\alpha_1^2} \right)^2, \quad t > 0.$$

Неравенство (10) (см.(12)) доказано.

Обозначим

$$\bar{S}(t) = \sup_{0 \leq u \leq t} S(u), \quad t > 0, \quad \bar{S} = \sup_{t \geq 0} S(t)$$

и при $x > 0$ и $t > 0$ запишем равенства

$$\begin{aligned}
0 \leq P(w(t) < x) - P(w^* < x) &= P(\bar{S} \geq x) - P(\bar{S}(t) \geq x) = \\
&= P(\bar{S}(t) < x, \bar{S} \geq x).
\end{aligned} \tag{13}$$

Равенство (13) является следствием известных формул модели $G| \square G \square 1 \square \infty$ (см. [7]) :

$$P(w(t) < x) = P(\bar{S}(t) < x), \quad P(w^* < x) = P(\bar{S} < x), \quad x \geq 0. \tag{14}$$

Далее по неравенству Чебышева при $x > 0$, $t > 0$ имеем

$$P(\bar{S}(t) < x, \bar{S} \geq x) = \int_t^\infty P(S(u) \geq x) du \leq \int_t^\infty \frac{M(S(u) + u - \beta_1 H(u))^4}{(x + u - \beta_1 H(u))^4} du. \tag{15}$$

Используя оценку (10) и неравенство Лордена, при $x \geq \frac{\rho_1 \alpha_2}{\alpha_1^2}$ и $t > 0$ из (15)

получаем

$$P(\bar{S}(t) < x, \bar{S} \geq x) \leq (m_4 + 12m_2^2) \int_t^\infty \frac{\left(\frac{u}{\alpha_1} + \frac{\alpha_2}{\alpha_1^2} \right)^2 du}{\left(x - \rho_1 \frac{\alpha_2}{\alpha_1} + u(1 - \rho_1) \right)^4} = A \int_t^\infty \frac{\left(u + \frac{\alpha_2}{\alpha_1} \right)^2 du}{\left(\frac{x - \frac{\rho_1 \alpha_2}{\alpha_1}}{1 - \rho_1} + u \right)^4} =$$

$$= A \int_{t+\frac{\alpha_2}{\alpha_1}}^{\infty} \frac{y^2 dy}{\left(\frac{x - \frac{\alpha_2}{\alpha_1}}{1 - \rho_1} + y \right)^4} < A \int_{t+\frac{\alpha_2}{\alpha_1}}^{\infty} \frac{dy}{\left(\frac{x - \frac{\alpha_2}{\alpha_1}}{1 - \rho_1} + y \right)^2} = A \left(\frac{x - \frac{\rho_1 \alpha_2}{\alpha_1}}{1 - \rho_1} + t \right)^{-1},$$

откуда, в силу (13), следует оценка (4). При этом в качестве константы $A > 0$ использована константа, определяемая равенством (3).

Теперь при $x > 0, y > 0, t > 0$ приступим к оценке разности

$$P(w_y(t) < x) - P(w(t) < x).$$

Имеем

$$\begin{aligned} 0 &\geq P(w_y(t) < x) - P(w(t) < x) = P(w(t) \geq x) - P(w_y(t) \geq x) = \\ &= -P(S(t) - \inf_{0 \leq u \leq t} S(u) < x, S(t) + y \geq x) \geq -P(x > S(t) \geq x - y) \geq \\ &\geq -P(S(t) \geq x - y). \end{aligned} \quad (16)$$

Неравенства (16) являются следствием (14). Поэтому при $t > 0, x > 0, y > 0$ имеем

$$P(w(t) < x, w_y(t) \geq x) = P(S(t) - \inf_{0 \leq u \leq t} S(u) < x, S(t) \geq x - y).$$

Как и выше, при $t > 0, x > 0, y > 0$ и дополнительном условии $x - y \geq (\rho_1 \alpha_2) / \alpha_1$ имеем

$$\begin{aligned} P(S(t) \geq x - y) &\leq \frac{M(S(t) + t - \beta_1 H(t))^4}{(x + t - \beta_1 H(t))^4} \leq \\ &\leq A \frac{\left(t + \frac{\alpha_2}{\alpha_1} \right)^2}{\left(\frac{x - y - \frac{\rho_1 \alpha_2}{\alpha_1}}{1 - \rho_1} + t \right)^4} < A \left(\frac{x - y - \frac{\rho_1 \alpha_2}{\alpha_1}}{1 - \rho_1} + t \right)^{-2}, \end{aligned}$$

откуда из (16) следует (5).

Теорема доказана.

5. Доказательство следствия. Если поменять местами последовательности $\{u_n\}$ и $\{v_n\}$, то получим новую модель $GI \square G \square 1 \square \infty$, загрузка которой из-за смены местами α_1 и β_1 равна $\beta_1 / \alpha_1 = 1 / \rho_1 < 1$, если $\rho_1 > 1$.

В силу известных формул модели $GI \square G \square 1 \square \infty$ (см. [8]) в новой модели $GI \square G \square 1 \square \infty$ ФР накопленной и невыполненной работы к моменту t и ее стационарной

ՓՐ совпадают с ՓՐ $P(I(t) < x)$ и $I^*(x)$ соответственно в первоначальной модели GI $| G | 1 | \infty$.

Поэтому при замене условий (2) на условия (6) в случае $\rho_1 > 1$ оценка (8) следует из оценки (4).

Константа В в (8), в силу (3)-(4), может быть выбрана как в (7).

Следствие доказано.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Thomsen E.** OLAP Solutions, John Wiley&Sons, Inc.-2002. - 660 с.
2. **Snell J., Tidwell D., Kulchenko P.** Programming Web Services with SOAP, O'Reilly & Associates, Inc. -2002. -245 с.
3. **Spofford G.** MDX Solutions, John Wiley & Sons, Inc. -2001. -432 с.
4. **Harold E. R., Means W. S.** XML in a Nutshell, O'Reilly & Associates, Inc. -2002. -634 с.
5. **Клейнрок Л.** Вычислительные системы с очередями.-М.: Мир, 1979. -600 с.
6. **Гнеденко Б. В., Коваленко И. Н.** Введение в теорию массового обслуживания.-М.: Наука, 1987. -336 с.
7. **Боровков А. А.** Вероятностные процессы в теории массового обслуживания.-М.: Наука, 1973. -367 с.
8. **Prahu N. U.** Stochastic Storage Processes.-Springer-Verlag, New-York-Heidelberg-Berlin, 15. - 1980. -140 с.
9. **Кокс Д. Р., Смит В. Л.** Теория восстановления.-М.: Сов. Радио, 1967. -299 с.
10. **Lorden F.** On excess over the boundary. - Ann. Math. Statistics. -1979. -41, -C. 520-527.

ЕГУ. Материал поступил в редакцию 14.10.2003.

S.U. ԳՐԻԳՈՐՅԱՆ

ԻՆՏԵՐՆԵՏ ԾԱՌԱՅՈՒԹՅԱՆ ԱՇԽԱՏԱՆՔԻ ԾԱՎԱԼԻ ԳՆԱՀԱՏՈՒՄԸ ՏՎՅԱԼՆԵՐԻ ՀԵՆՔԻՆ ՀԱՐՅՈՒՄՆԵՐԻ ԴԵՊՔՈՒՄ

Ինտերնետ-սերվիս մոդուլի աշխատանքի ծավալը տվյալների հենքին հարցումների դեպքում գնահատվում է GI | G | 1 | ∞ հերթի մոդելի շրջանակներում: Մոդելի հայտնի արդյունքների օգտագործման համար գտնված է կուտակված աշխատանքի՝ իր ստացիոնար արժեքին զուգամիտության արագությունը:

T.A. GRIGORYAN

ON ESTIMATION OF INTERNET-SERVICE WORK-VOLUME IN DATABASE REQUESTS

The work-volume of internet-service module in case of requests to the GI | G | 1 | ∞ model of queue is estimated. To use the known requests of the model, the rate of convergence of accumulated work to its stationary value is found.

Г.В. АЗИЗБЕКЯН, Э.А. АРУТЮНЯН, Р.А. КАЗАРЯН, А.М. МАНУКЯН

**РАЗРАБОТКА ПРИНЦИПОВ НОВОГО
ОПТИКО – МЕХАНИЧЕСКОГО УСТРОЙСТВА
ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ МАЛЫХ НАКЛОНОВ**

На основе проведенных исследований оптических свойств ряда тонкослойных оптических систем разработано новое оптико-механическое устройство (наклономер) для измерения малых наклонов. Устройство основано на зондировании оптического «ближнего поля», образованного на поверхности оптического элемента в условиях полного внутреннего отражения. Лабораторные испытания показали, что наклономер обладает возможностями для достижения чувствительности измерений смещений и наклонов на уровне 5 нм и 10^{-3} угл.с. соответственно.

Ключевые слова: сейсмика, наклономер, скважина, оптико-механическое устройство.

Разработка методов измерения малых наклонов для оценки текущей сейсмической опасности и предварительного прогнозирования землетрясений продолжает оставаться основной задачей сейсмологии [1].

К используемым в этой области современным устройствам – наклономерам предъявляется ряд требований, главными из которых являются высокая чувствительность измерений малых наклонов и одновременная малогабаритность для обеспечения помехозащищенности от атмосферных и других внешних воздействий в глубоких скважинах.

Целью данной работы является разработка достаточно простого в изготовлении наклономера для использования в скважинных наблюдениях. Для обеспечения высокой чувствительности в качестве основного функционального узла разрабатываемого наклономера нами используются специальные тонкослойные оптические системы, зондируемые монохроматическим источником света в условиях полного внутреннего отражения.

Экспериментальные исследования и модельный анализ с помощью универсальной программы на компьютере ряда многослойных периодических структур диэлектрических и металлических пленок позволили сделать выбор наиболее эффективных для этих целей структур. В итоге, для измерения малых смещений и наклонов в первом варианте была выбрана система оптического волновода (рис.1) с воздушным зазором 1 и металлическим (Ag) покрытием внутренних поверхностей 2 и 3 пластины 4 и призмы связи ($n=1,517$) с формой полусферы 5, зондируемая монохроматическим излучением лазера 6. Отраженный сигнал регистрируется с помощью приемника 7.

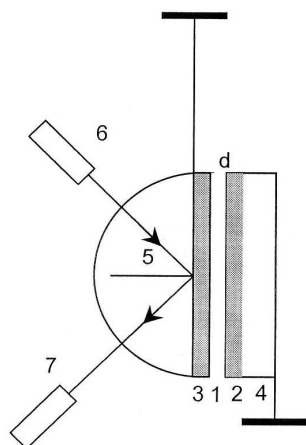


Рис.1. Система оптического волновода с воздушным зазором и металлическим покрытием внутренних поверхностей

На рис.2 представлено угловое распределение интенсивности отраженного сигнала в относительных единицах (R) для волноводных мод характерного полуоткрытого оптического волновода с оптимальными параметрами зондирующего излучения с длиной волны $\lambda = 632,8 \text{ нм}$ (кривая 1), полученное с помощью модельного анализа на компьютере.

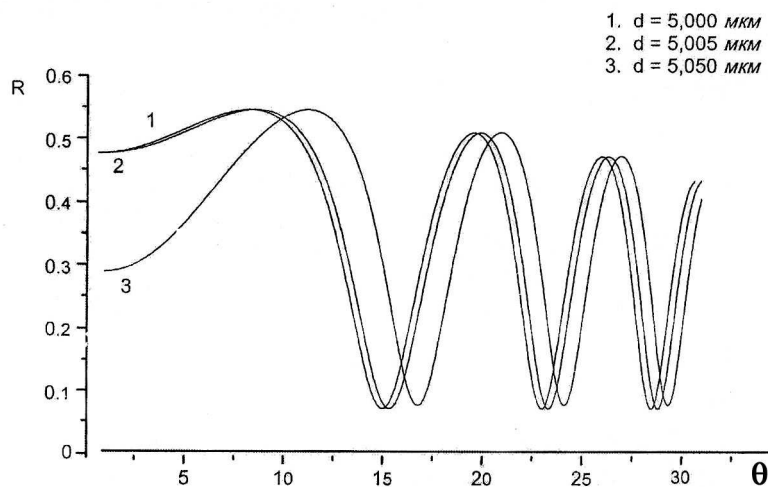


Рис.2.

Распределение волноводных мод оптического волновода (рис.1) при разных величинах расстояния между пластинами

При изменении расстояния между пластинами d на 5 нм происходит смещение модового спектра (кривая 2), при этом наибольший сдвиг обнаруживает первая волноводная мода ($m=0$). Наблюдаемый сдвиг соответствует изменению интенсивности (по сравнению со значением на максимуме линии) на 10%, что выше уровня статистического разброса значений сигнала. Кривая 3 соответствует сдвигу величины d на 50 нм.

Для регистрации местного наклона земной поверхности с помощью рассматриваемого наклономера полусфера оптического устройства 5 должна жестко

закрепляться со скальным грунтом Земли, тогда как подвижная пластина 4 устанавливается на подвешенном маятнике и остается абсолютно свободной от любых изменений рельефа. При выбранных габаритах наклономера (длина 1,0 м) изменению d на 5 нм соответствует расчетный угловой наклон с амплитудой 10^{-3} угл. с.

Экспериментальные исследования показали, что обеспечение требуемых для данного варианта ряда условий и, в первую очередь, точной юстировки плоскопараллельности зеркал 2 и 3 сопряжено с большими техническими сложностями. Дальнейшая модификация этого метода позволила разработать более усовершенствованный вариант оптико-механического наклономера, в котором не требуется обеспечение условия плоскопараллельности. При этом одновременно обеспечивается высокая чувствительность измерений наклонов.

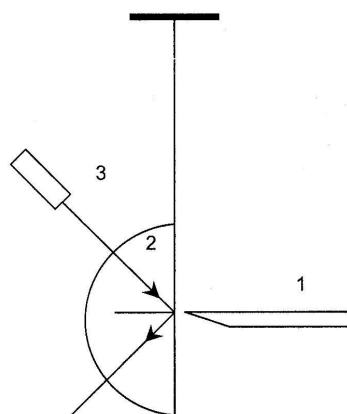


Рис.3. Оптическая схема основного функционального узла наклономера с детектированием оптического сигнала в «ближнем поле»

Принцип работы наклономера данного типа основан на замене подвижной пластины волновода 4 (рис.1) на тонкий щуп из световолокна 1 (рис.3) с заостренным концом, который выполняет функцию коллектора оптического «ближнего поля», образованного на нижней границе оптического элемента 2 без покрытия ($n=1,64$) в условиях полного внутреннего отражения от излучения лазера 3.

Детальное описание научных и практических исследований, посвященных применению «ближнего поля», приведено в [2-4].

В наших экспериментах для зондирования «ближнего поля» использовалось заостренное световолокно, полученное методом скола, на другом конце которого находится приемник оптического сигнала – фотодиод. Калибровка нового наклономера проводилась с помощью собранной для этих целей установки, блок-схема которой приведена на рис.4.

Луч излучения He-Ne лазера 1 (ЛГ-111) на длине волны $\lambda = 632,8$ нм направляется через модулятор 2 и полупрозрачное зеркало 3 на внутреннюю поверхность призмы 4 под углом, превышающим угол полного внутреннего отражения, и в результате на внешней поверхности призмы формируется оптическое «ближнее поле». Заостренный конец световолокна 5, закрепленный на пьезоэлектрическом двигателе 6, с помощью цифро-амплитудного преобразователя 7, управляемого компьютером 8, с шагом 50 нм перемещается в «ближнем поле» в перпендикулярном направлении к грани призмы. Сигнал от фотодиода 9 (ФД-256), присоединенного к другому концу световолокна, с помощью синхронного усилителя 10 передается на компьютер 8. Опорным каналом является фотодиод 11, который через синхронный усилитель 12 вырабатывает синхросигнал и также присоединен к компьютеру 8.

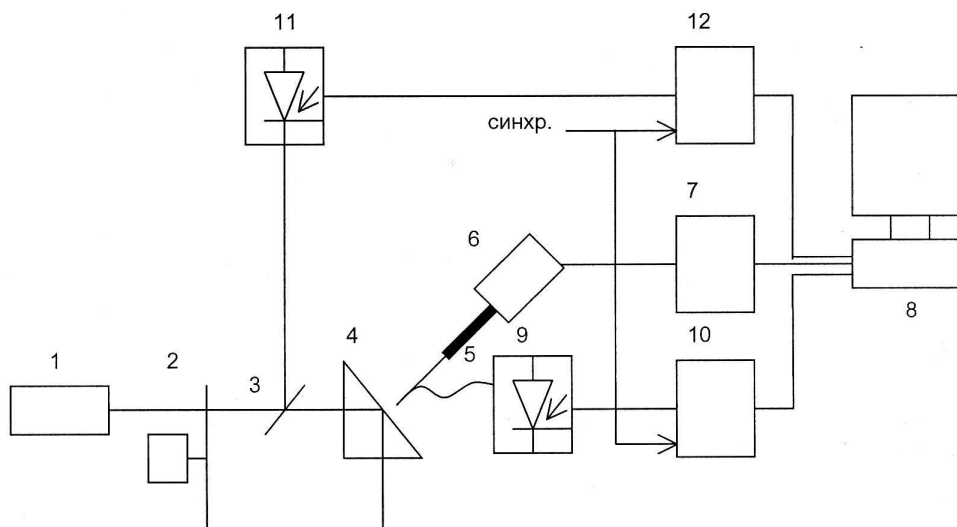


Рис.4. Блок-схема установки для измерения параметров оптического «ближнего поля» и калибровки наклономера

На рис.5 приведены данные измерений зависимости детектируемого оптического сигнала в «ближнем поле» от расстояния до поверхности грани призмы. Видно, что экспериментальные точки хорошо согласуются с теоретической кривой, которая описывается выражением

$$I \sim \exp \left\{ -2kd[\sin^2 \theta_i - (1/n_i)^2]^{1/2} \right\},$$

где k – волновой вектор падающего света; d – расстояние от поверхности призмы; n_i – показатель преломления призмы; θ_i – угол падения в области, превышающей критический угол θ_c .

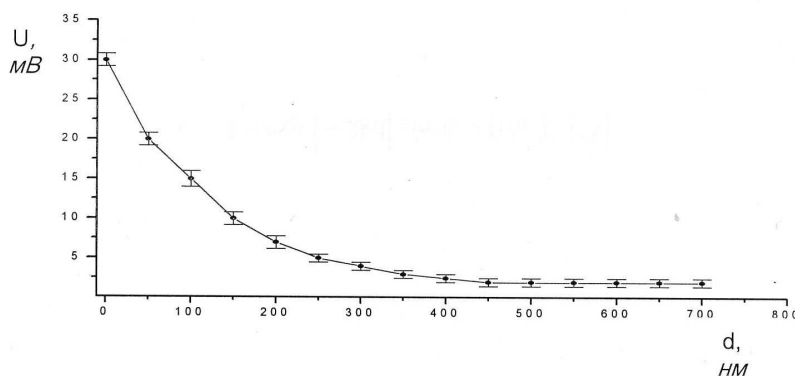


Рис.5. Экспериментальная зависимость детектируемого оптического сигнала в «ближнем поле» от расстояния до поверхности грани призмы

Малая область локализации оптического поля (300(400 нм) и обусловленная этим фактором большая крутизна кривой позволяют на основе детектирования сигнала «ближнего поля» регистрировать смещение в поперечном направлении с

разрешающей способностью 5 нм, что соответствует измерению наклонов (при длине маятника 1,0 м) с чувствительностью 10^{-3} угл.с.

Таким образом, данные проведенных лабораторных исследований указывают на перспективность оптико-механического наклономера данного типа для испытаний в натуральных условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сборник «Сейсмические приборы». Вып.22. - М., 1991.
2. Courjon D., Sarayeddine K. and Spajer M. Opt. Comm. 71.-1989. - № 2. - P. 23.
3. Specht M., Pedarnig I.D., Heckl W.M. and Hinch T.W. Phys. Rev. Lett. 68. - 1992. - № 4. - P. 476.
4. Adam P.M., Salomon L., de Fornel F. and Goudonnet I.P. Phys. Rev. B, 48. - 1993. - № 4. - P. 2680.

Инженерный Центр НАН РА. Материал поступил в редакцию 27.11. 2002.

Հ.Վ. ԱԶԻԶԲԵԿՅԱՆ, Է.Հ. ՀԱՐՈՒԹՅՈՒՆՅԱՆ, Ռ.Ա. ՂԱԶԱՐՅԱՆ,
Ա.Մ. ՄԱՆՈՒԿՅԱՆ

ՓՈՔՐ ԹԵՔՎԱԾՔՆԵՐԻ ԶԱՓՄԱՆ ՀԱՄԱՐ ՆՈՐ ՕՊՏԻԿԱ-ՄԵԽԱՆԻԿԱԿԱՆ ՍԱՐՔԻ ՄԿՁԲՈՒՆՔՆԵՐԻ ՄՇԱԿՈՒՄ

Մի շարք նրբաշերտ օպտիկական համակարգերի օպտիկական հատկությունների հետազոտությունների հիման վրա մշակված է նոր օպտիկաօմեխանիկական սարք (թեքաչափ)՝ փոքր թեքվածքներ չափելու համար: Մարքը հիմնված է լրիվ ներքին անդրադարձման պայմաններում օպտիկական էլեմենտի մակերեսի վրա առաջացած ‘մերձակա դաշտի’ գոնդավորման սկզբունքի վրա: Լաբորատոր փորձարկումները ցույց են տվել, որ թեքաչափը ռեալ հնարավորություններ ունի ապահովելու տեղաշարժերի և թեքվածքների չափման զգայնություններ՝ համապատասխանաբար 5 նմ և 10^{-3} անկյունային վայրկյան կարգի:

H.V. AZIZBEKYAN, E.A. ARUTUNYAN, R.A. KAZARYAN, A.M. MANUKYAN

NEW OPTICAL-MECHANICAL DEVICE DEVELOPMENT FOR SMALL TILT MEASUREMENTS

To measure small inclinations (tilts), a new optical-mechanical device (inclinometer, tiltmeter) has been developed on the basis of investigations of optical properties of various thin-layer optical systems. The device operation is based upon the principle of probing the optical “near field” which is formed at optical element surface under total reflection conditions. As laboratory tests have shown, the tiltmeter is able to provide shift and tilt measurement sensitivities on the level of 5 nm and 10^{-3} sec. of arc. respectively.

Р.А. ХУРОДЗЕ

НЕКОТОРЫЕ НОВЫЕ ПОДХОДЫ В МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ

Проводится анализ современного состояния проблемы надежности инфокоммуникационных систем. Описывается математический подход к надежному планированию этих систем. Вводится экономический критерий оптимизации многокомпонентной резервированной системы с отдельным обслуживанием очередей замещений и восстановлений, ставится соответствующая задача математического программирования. Анализируется длительность простоя резервированных систем, как важный показатель надежности, обсуждаются некоторые аспекты ее вероятностного анализа.

Ключевые слова: надежность, обслуживание, очередь, замещение, восстановление, оптимизация, простой.

Введение. Создание надежных систем является стратегической целью любого индустриального общества. Характерно, что надежность стала отдельной научно-технической дисциплиной с начала второй мировой войны. Проблемы, которые возникали в армии США, а далее при осуществлении космических программ США и СССР, привели к осознанию определяющего значения надежности систем [1]. С самого начала в задачах обеспечения надежности сложных технических систем плодотворно применялись математические методы, которые в настоящее время составляют важную часть общей теории надежности. При этом математическая теория надежности развивается в соответствии с теми тенденциями, которые проявляются в ведущих областях техники и технологий.

Современные тенденции в теории и практике надежности наиболее полно и ярко проявляются в задачах планирования, проектирования, эксплуатации и модернизации компьютерных и телекоммуникационных систем и сетей (инфокоммуникационных систем).

Инфокоммуникация является одной из наиболее динамично развивающихся отраслей техники и экономики во всех странах мира, создает ведущую производственную инфраструктуру общества и является основой глобальной информационной инфраструктуры. Вместе с тем, в настоящее время общепризнано, что решающим фактором формирования и эффективного функционирования производственной инфраструктуры является свободная конкуренция. В этом отношении инфокоммуникация занимает особое место среди других отраслей науки и техники, вследствие чего она считается одним из наиболее интересных объектов исследования компонентов качества, в том числе надежности, в аспекте экономических факторов.

Суть вопроса заключается в следующем. В развитых странах мира накоплены большое теоретическое знание и практический опыт создания и развития производственной инфраструктуры различного вида (энергетика, транспорт и др.) в условиях рыночной экономики. Постсоциалистические страны в настоящее время интенсивно осваивают упомянутый опыт. Это означает, что управляющие решения,

как правило, принимаются на основе экономических интересов. В этом смысле в телекоммуникации и информатике опыт развитых стран значительно мал по следующим причинам.

Информатика - новая область, и ее роль и место в жизни общества пока еще не определены. Она находится на стадии становления, развивается бурно, но без единой методологии, и пока далека от четко поставленных целей и задач. Поэтому пока трудно говорить об установившихся тенденциях ее дальнейшего развития.

Что касается телекоммуникации, она имеет вековую историю и четко поставленные проблемы, которые решаются на основе хорошо продуманной теории высококвалифицированными специалистами. Однако, вследствие своей особой специфики, телекоммуникация, даже в западных странах, не развивалась в условиях свободной конкуренции. До 80-х годов прошлого века во всех индустриальных странах Европы телекоммуникация была монополизирована государством [2]. Только в 1984 году начался процесс либерализации и демополизации в телекоммуникации Великобритании, а затем и в других европейских странах. В 1984 г. Еврокомиссия выпустила "Зеленую книгу", в которой было определено, что монополия в телекоммуникации в странах Евросоюза максимально ограничивается. В США, начиная с 20-х годов прошлого века, монополистом в телекоммуникации был знаменитый гигант - компания AT&T. Раньше такая монополия по некоторым специфическим причинам была фактором развития, однако с 70-х годов прошлого века она уже сдерживала развитие телекоммуникационной инфраструктуры США. В 1984 г. по решению Министерства юстиции США компания AT&T была реорганизована и потеряла право на эксплуатацию местных телефонных сетей. Ответственность за это стали нести семь региональных компаний, и тем самым создавалась среда свободной конкуренции [3-5].

Такова природа проблемы, с которой мы имеем дело – инфокоммуникация в индустриальных странах мира стала развиваться по законам рыночной экономики в течение последних 10-15 лет, и проблемы в этой области теперь решаются на основе этих законов, в том числе проблема обеспечения высокой надежности компьютерных и телекоммуникационных сетей и их компонентов.

В рамках данной статьи в качестве объекта исследования мы рассматриваем инфокоммуникационные сети и системы, их подсистемы и созданные на их основе различные системы управления. Все они, как правило, являются многофункциональными сложными системами, и достижение высокого качества их функционирования становится основным фактором финансового и рыночного успеха как производителей оборудования, так и поставщиков инфокоммуникационных услуг (операторов) [4,5].

Заметим, однако, что модели анализа и оптимизации, разработанные нами, пригодны для исследования многих других технических систем и тем самым являются, в определенном смысле, универсальными. Такая универсальность основывается на изоморфизме процессов, протекающих в системах различной природы, абстрактным процессам в их математических моделях. Подтверждением тому служит вся долгая история приложений математических методов в научных исследованиях.

Вместе с тем, среди компонентов качества функционирования вышеозначенных технических систем надежность - один из основных. Поэтому обеспечение надежности является неотъемлемой составной частью управления качеством или, по современной терминологии, менеджмента качества ("quality management") [2-4].

Экономические и математические аспекты надежного планирования. Несмотря на то, что качество элементной базы технических систем, особенно инфокоммуникационных, в течение последних десятилетий непрерывно повышается, проблема их надежности остается острой проблемой современности. Одной из самых важных причин этого обстоятельства является то, что требования к надежности систем возрастают быстрее, чем надежность элементной базы [3,7,8].

В этих условиях, в рамках теории надежности, возникают новые направления, которые более адекватно отражают такие факторы развития в области инфокоммуникации, как открытость рынка услуг, обострение конкуренции между операторами, повышение требований к качеству услуг со стороны пользователей и др. [2-5]

Суть вопроса состоит в следующем. Низкая надежность грозит операторам инфокоммуникационных услуг не только возможной потерей пользователей, но непосредственно влияет на экономические показатели. Отказ пользователям в предоставлении услуг вследствие неработоспособности применяемых средств (технических, программных и др.) - это упущенный доход и часто прямые убытки из-за штрафных санкций, предъявляемых пользователями в результате низкого качества предоставляемых услуг [3,4].

Для разрешения означенной проблемы по поручению Международного Союза Электросвязи (МСЭ) шведские специалисты разработали рекомендацию E.862 "Надежное планирование телекоммуникационных сетей", которая была окончательно одобрена в 1992 г. В ней отмечается, что при планировании, проектировании, эксплуатации и техническом обслуживании телекоммуникационных сетей и систем необходимо учитывать экономические потери вследствие ненадежности, которые несут как операторы телекоммуникационных услуг, так и пользователи [2-6].

Не вдаваясь в подробности англо-русских терминологических соответствий, заметим, что русская "надежность" переводится на английский язык как "reliability" или "dependability". При этом английским эквивалентом научно-технического термина "надежность" традиционно считается "reliability", а "dependability" - более широкое понятие, включающее в себя надежность в традиционном (узком) смысле, а также "безопасность" и (иногда) "живучесть". В нашем изложении термин "надежность" нужно понимать именно в смысле английского "dependability", т.е. в широком смысле.

Среди важнейших направлений надежного планирования выделяется задача определения оптимального количества резервных элементов и средств (органов) технического обслуживания для случаев, когда элементы системы ненадежны, т.е. подвергаются отказам и теряют работоспособность.

В наиболее общей форме задача формулируется следующим образом.

Техническая система состоит из основных и резервных ненадежных, восстанавливаемых элементов. Основные элементы несут рабочую нагрузку, и требуется поддержание всех основных элементов в работоспособном состоянии, а в случае их меньшего количества система несет потери. В случае отказа основного элемента он замещается одним из резервных элементов, а сам передается на восстановление. Резервные элементы тоже отказывают, после отказа восстанавливаются и остаются в резерве.

Поскольку отказы элементов, операции их замещения и восстановления имеют стохастический характер, то весь процесс технического обслуживания резервированной системы означенного типа является стохастическим, и его исследование проводится в рамках теории массового обслуживания. В частности, моделями процессов замещений и восстановлений являются замкнутые системы массового обслуживания (СМО) весьма специального вида.

Если система содержит ненадежные восстанавливаемые элементы - как основные, так и резервные, то отказ основного элемента порождает два требования: замещение отказавшего основного элемента резервным и восстановление отказавшего элемента. При этом считается, что длительность замещения незначительна и ею можно пренебречь. Однако, когда отдельные элементы, в свою очередь, представляют собой сложные устройства и системы, то операция замещения становится достаточно сложной, и пренебрегать ее длительностью нельзя. Отметим, что замещение, как правило, подразумевает подготовку резервного элемента для работы, его переключение и приведение к такому состоянию, чтобы он мог нести рабочую нагрузку. Поэтому в сложных системах замещение выделяется в самостоятельную операцию (независимую от восстановления), которая часто выполняется отдельным органом замещения (ОЗ).

Таким образом, получается, что в сложных системах описанного типа организуется система обслуживания очередей замещений и восстановлений, при этом количество органов восстановления (ОВ) и замещения может быть произвольным. Анализ таких систем, а также определение оптимального количества органов обслуживания (восстановления и замещения, когда они разделены), как и оптимального количества резервных элементов по экономическим критериям, является актуальной проблемой теории и практики надежности.

Общая модель анализа и оптимизации с отдельным обслуживанием замещений и восстановлений. Рассмотрим резервированную систему, в которой m – количество основных элементов, n – число резервных элементов, k – количество ОВ, l – число ОЗ. Элементы системы (как основные, так и резервные) отказывают с интенсивностями α и β соответственно, восстанавливаются с интенсивностью μ и замещаются в случае надобности с интенсивностью λ .

Процесс функционирования рассматриваемой системы описывается функциями $P(i, j, t) = \{P \text{ в момент времени } t \text{ число недостающих основных элементов равно } j; \text{ число неработоспособных элементов системы равно } i\}$, где $j = \overline{1, m}$, $i = \overline{1, n + j}$.

Обозначим $P(i, j) = \lim_{t \rightarrow \infty} P(i, j, t)$.

В качестве целевой функции вводится показатель экономической эффективности системы:

$$F(m, n, k, l) = (r_1 - c_1) E_1 + (r_2 - c_2) E_2 - \sum_{k=3}^7 c_k E_k. \quad (1)$$

Здесь r_1 и r_2 - доходы в единицу времени, соответственно, от одного работоспособного (РС) основного элемента и одного РС резервного элемента; $c_1 - c_7$ - затраты в единицу времени, соответственно, на: одного РС основного элемента; на одного РС резервного элемента; одного неработоспособного (НРС) резервного элемента; одного работающего ОВ; одного неработающего ОВ; одного работающего ОЗ; одного неработающего ОЗ.

Обозначим $E_i = E_i(m, n, k, l)$, где $E_1 - E_7$ - соответственно среднее количество основных элементов; РС резервных элементов; НРС резервных элементов; работающих ОВ; неработающих ОВ; работающих ОЗ; неработающих ОЗ.

Пусть $p(j) = \sum_{i=0}^{n+j} p(i, j)$. Тогда

$$\begin{aligned} E_1 &= \sum_{j=0}^m (m-j)p(j); \quad E_2 = \sum_{j=0}^m \sum_{i=0}^{n+j} (n-i)p(i, j); \quad E_3 = \sum_{j=0}^m \sum_{i=0}^{n+j} (i+j)p(i, j); \\ E_4 &= \sum_{j=0}^m \sum_{i=0}^k ip(i, j) + \sum_{j=0}^m \sum_{i=k+1}^{n+j} kp(i, j); \quad E_5 = \sum_{j=0}^m \sum_{i=0}^k (k-i)p(i, j); \\ E_6 &= \sum_{j=0}^m \sum_{i=0}^{n+j} jp(i, j)(\delta_1(i, j) + \delta_2(i, j)) + \\ &+ \sum_{j=0}^m \sum_{i=0}^{n+j} (n+j-i)p(i, j)(\delta_3(i, j) + \delta_4(i, j)) + \\ &+ \sum_{j=0}^m \sum_{i=0}^{n+j} lp(i, j)(\delta_5(i, j) + \delta_6(i, j)); \quad E_7 = l - E_6. \end{aligned}$$

Здесь $\delta_k(i, j) = \{1, \text{если } A_k(i, j) - \text{истинное предложение; } 0 - \text{в противном случае}\}.$

$(k = \overline{1, 6}, j = \overline{0, m}, i = \overline{0, n+j})$, где

$$A_1 = (j \leq n+j-i \leq l); \quad A_2 = (j \leq l < n+j-i); \quad A_3 = (n+j-i < j \leq l);$$

$$A_4 = (n+j-i < l \leq j); \quad A_5 = (l < j \leq n+j-i); \quad A_6 = (l < n+j-i < j).$$

В рамках теории массового обслуживания и надежности исходные экономические характеристики π_i ($i=1, 2$) и c_i ($i=1, 2, \dots, 7$) считаются заданными. Вероятностные характеристики $p(i, j)$ можно определить аналитическими, численными или компьютерными методами в зависимости от исходной модели обслуживания. В задачах экономического анализа они также считаются заданными, и в этих условиях формулируется задача математического программирования (оптимизационная задача): при фиксированном m функция F зависит от трех аргументов: n, k, l . Для

заданного значения m требуется найти тройку (n, k, l) , которая придает функции F максимальное значение.

Построение и исследование моделей для определения $p(i,j)$ только начинается (9-11), и можно надеяться, что в ближайшее время ведущие специалисты обратят на эту проблему более пристальное внимание.

О простое резервированных систем. В течение последних 10-15 лет одним из самых важных показателей надежности технических систем, особенно инфокоммуникационных, становится длительность простоя [3-6]. В работах [3-5,7] проводится системный анализ технических, организационных и социально-экономических факторов, приводящих к такому положению. Там же указываются возможные направления дальнейших исследований.

В США для оценки надежности элементов и подсистем телекоммуникационных сетей применяют три характеристики: первая характеризует снижение качества обслуживания на сети; вторая – продолжительность периода неработоспособности (время простоя); третья – широту распространения влияния отказа на сеть [2,4,5]. Японские специалисты также считают, что время простоя (продолжительность периода неработоспособности) – важный показатель надежности [5,11]. Они отмечают, что особенно нежелательны для пользователей длительные перерывы связи в сетях. Поэтому предлагают ввести некоторый временной порог. Простои продолжительностью более этого порога считаются длительными. Предполагается, что после таких простоев потери (убытки) операторов сетей связи резко и скачкообразно возрастают вследствие предъявленных пользователями штрафных санкций.

Для иллюстрации важности длительности простоя, как показателя надежности, рассмотрим пример. В современных телекоммуникационных сетях на основе одной системы SDH (Synchronous Digital Hierarchy) уровня STM-16 (Synchronous Transfer Mode) можно организовать до 30240 основных цифровых каналов. Очевидно, насколько значительными будут убытки сети даже в случае одного отказа, если его длительность окажется существенно большей [4-5].

Кроме того, для многих объектов управления в современных АСУ важно обеспечить определенное время простоя управляющей системы (УС). Частые отказы в таких системах, в принципе, не ухудшают характеристики объекта управления, если длительности соответствующих прерываний не будут превышать определенных (случайных или постоянных) величин. Добавим также, что важно обеспечить не только малую среднюю длительность простоя, но также и малый разброс этой длительности вокруг ее среднего значения.

Тем самым становится очевидной актуальность точного вероятностного анализа длительности простоя отказавших технических систем и их компонентов [2-5].

Несмотря на вышеизложенное, к настоящему времени в научно-технической литературе мало публикаций, посвященных непосредственно анализу простоя систем, в том числе резервированных.

К числу причин такого положения можно отнести следующие:

- процесс осмысления теоретических и методологических аспектов задач, возникающих на практике под воздействием вышеперечисленных факторов, как правило, протекает медленно;

- в отличие от задач по анализу стандартных показателей надежности, не сложилась еще традиция постановки и решения задач по анализу простых систем, особенно сложных систем;

- построение и исследование моделей анализа простых требуют привлечения более тонких эвристических и аналитических средств по сравнению с традиционными.

Известны несколько работ, посвященных анализу простых резервированных систем [8,9,12-16]. В [8, 12] проводится исчерпывающий вероятностный анализ простой дублированной системы, сначала в предположении экспоненциального распределения длительностей безотказной работы основного и резервного элементов [8], а затем в предположении произвольных распределений всех исходных временных характеристик [12].

Там же устанавливается интересный и важный во многих отношениях факт, что длительность простой рассматриваемой системы зависит от длительности ее безотказной работы. Таким образом, получается, что последовательность случайных длительностей безотказной работы (наработки) и восстановлений системы образует альтернирующий процесс восстановления с зависимыми компонентами.

В работах [14,16] изучаются некоторые аспекты простой тройрованной системы. В [14] два основных элемента (вычислительные машины) в качестве скользящего резерва используют третий, который может находиться в любом режиме по нагрузке (ненагруженный, облегченный, нагруженный).

При этом все исходные временные характеристики (длительности безотказной работы элементов, длительности восстановления), кроме времени переключения, распределены экспоненциальным законом.

Отметим также, что в [14] вероятностная характеристика длительности простой не представляет собой самостоятельный интерес – она используется лишь для сведения дублированной системы к одноканальной и тройрованной системы – к дублированной.

Анализ простой тройрованной системы в довольно общих предположениях относительно исходных статистических характеристик проводится в [16]. Что касается многоканальных систем, проблема анализа их проста находится только на начальной стадии своего решения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Second International Conference on Mathematical Methods in Reliability. Abstracts Book. Bordeaux. - France, 2000.
2. **Hank Intern, Jeremy Oliver, Edgardo Sepulveda.** Telecommunication Regulation Handbook. - Washington. The World Bank, 2000.
3. **Хуродзе Р.А.** О новых подходах в теории и практике надежности резервированных систем // Информационные технологии в проектировании и производстве. - 2001. - №3,
4. Handbook on Quality of Service and Network Performance // CCITT. - Geneva, 1993.

5. **Нерес В.А.** Надежность сетей связи: тенденции последнего десятилетия // Электросвязь. - 1998. - №1.
6. ITU-T Recommendation E.862. Dependability planing of telecommunication networks. - Geneva, 1992.
7. **Хуродзе Р.А.** Надежность аналоговых устройств систем управления. - М.: Наука, 2000.
8. **Какубава Р.В., Хуродзе Р.А.** Вероятностный анализ простоя дублированной системы с восстановлением и переключением // Автоматика и телемеханика. - 2000. - №9.
9. **Хуродзе Р.А., Какубава Р.В.** О надежностном планировании технических систем: математический подход // Вестник Российской Академии Естественных наук. - 2003. - №4.
10. **Khurodze R., Kakubava I., Svanidze N.** Analysis of closed queueing system with consideration of extra-system delays of service facility // Bulletin of the Georg. Acad. Sci. - 2003. - №2. - P. 168.
11. **Kakubava R., Chkhaidze N., Svanidze N.** Analysis of closed queueing system with consideration of extra-system delays of service facility// Bulletin of the Georg. Acad. Sci. - 2003.- №1. - P. 169.
12. **Какубава Р.В.** Длительность простоя – важный показатель надежности: о простое дублированных систем // Надежность. - М.: Технологии, 2003. - №3. – P. 169
11. **Khurodze R., Kakubava R., Chumburidze T.** Model of the analysis of duplicated system downtime with inspection // Bulletin of the Georg. Acad. Sci. - 2003. - №3.
12. **Вишне夫斯基 В.М., Ребортович Б.И., Тимохова Г.А.** Анализ вариантов организации многомашинных вычислительных центров в автоматизированных системах массового обслуживания с учетом надежности // Автоматика и телемеханика. - 1977. - №9.
13. **Какубава Р.В., Микадзе И.С.** Система обслуживания с дублированием // Кибернетика. - 1985. - №3.
14. **Хуродзе Р.А.** Модель простоя тройрованной системы // Надежность. - М.: Технологии. - 2003. - №3,

Груз. техн.-й ун-т.

Материал поступил в редакцию 4.10.2003.

Ռ.Ա. ԽՈՐՈԶԵ

ՈՐՈՇ ՆՈՐ ՄՈՏԵՅՈՒՄՆԵՐ ՀՈՒՍԱԼԻՈՒԹՅԱՆ ՄԱԹԵՄԱՏԻԿԱԿԱՆ ՏԵՍՈՒԹՅԱՆ ՄԵԶ

Բերվում է տեղեկահաղորդակցական համակարգերի հուսալիության խնդրի ժամանակակից վիճակի վերլուծությունը: Նկարագրվում է այդ համակարգերի հուսալի պլանավորման մաթեմատիկական մոդելը: Մտցվում է փոխարինման և վերականգնման հերթերի առանձին սպասարկմամբ բազմաբաղադրիչ պահեստավորված համակարգի օպտիմալացման տնտեսական չափանիշ, առաջադրվում է մաթեմատիկական ծրագրավորման համապատասխան խնդիր: Վերլուծվում է պահեստավորված համակարգերի պարապուրդի՝ որպես հուսալիության կարևոր չափանիշի տևողությունը, քննարկվում են վերջինիս հավանականային վերլուծության որոշ տեսանկյուններ:

R.A. KHURODZE

SOME NEW APPROACHES TO THE MATHEMATICAL THEORY OF RELIABILITY

The analysis of present-day problem state in info - communication system reliability is given. The mathematical approach to reliability design is described. An economical optimization criterion of a multicomponent redundant system with separate service of replacement and restoration queues is introduced, an appropriate mathematical programming task is set. Downtime duration of reserved systems as an important ratio of reliability is analyzed and some aspects of its probability analysis are discussed.

Ն.Գ. ՍՏԵՓԱՆՅԱՆ

ՄԵՏԱՂԱ-ԴԻԷԼԵԿՏՐՈՆԻԿԱԿԱՆ ԱԼԻՔՍԱՐԱՅԻՆ ԳՐԳՈՒՅԻ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄ

Հետազոտված է մետաղա-դիէլեկտրիկական ալիքատարի (ՄԴԱ) բարձր արդյունավետությամբ գրգռման նոր մեթոդ: Ցույց է տրված, որ գրգռող փողի լայն մասում տեղադրված մետաղական թիթեղների օգնությամբ H_{10} աշխատանքային ալիքով կարելի է ձևավորել դաշտի այնպիսի բաշխվածություն, որը շատ մոտ լինի մետաղա-դիէլեկտրիկական ալիքատարի LM_{11} աշխատանքային ալիքի դաշտի բաշխվածությանը: Ֆելդ-Ջաքսոնի մեթոդով հաշվարկված է LM_{11} աշխատանքային ալիքի գրգռման արդյունավետությունը, որը կազմել է՝ $\eta_{\text{առվ}}=0.987$: Գրգռիչի փորձնական հետազոտությունները կատարվել են 25...27 ԳՀg հաճախային ընդգրկությամբ: Ստացվել է հաշվարկային և փորձնական արդյունքների բավականին լավ համընկնում:

Առաջադիմ բառեր. մետաղա-դիէլեկտրիկական ալիքատար, գրգռիչ:

Միլիմետրային և մերձմիլիմետրային ընդգրկությամբ ստանդարտ մետաղական ալիքատարների կիրառումը սահմանափակվում է մարման զգալի մակարդակով և լայնական կտրվածքի փոքր չափերով (դրանք համեմատական են ալիքի երկարությանը) [1]: Ալիքատարի փոքր չափերն արգելակում են մեծ հզորությունների հաղորդումը և դժվարացնում նրա ճշգրիտ պատրաստումը: Լայն մետաղա-դիէլեկտրիկական ալիքատարները (ՄԴԱ) գուրկ են վերոհիշյալ թերություններից [2]: Այս առումով արդիական է ՄԴԱ-ի արդյունավետ գրգռման հարցը:

Քառակուսի կտրվածքով մետաղա-դիէլեկտրիկական ալիքատարի ամենապարզ գրգռումը կատարվում է H_{10} աշխատանքային ալիքով ուղղանկյուն մետաղական ալիքատարի օգնությամբ: ՄԴԱ-ի հետ մետաղյա լայն կտրվածքով ալիքատարի կցման ժամանակ լայնական չափերի համապատասխան ընտրությունն ապահովում է գրգռման բավականին մեծ արդյունավետություն՝ $\eta=0.93$ [2]: Մի շարք դեպքերում նշված մակարդակն անընդունելի է: Գրգռվող ալիքատարում փոխակերպման կորուստները նվազեցնելու համար անհրաժեշտ է այնտեղ կազմավորել այնպիսի դաշտ, որում դաշտի բաղադրիչների լայնությանին և փուլային բաշխվածությունները համընկնեն ՄԴԱ-ի LM_{11} ալիքի դաշտի բաշխվածության հետ:

Երկու ալիքատարների անմիջական կցման ժամանակ մետաղական ալիքատարի դաշտը ՄԴԱ-ում գրգռում է ալիքների գումար: Ֆելդ-Ջաքսոնի եղանակով ստացված բանաձևը թույլ է տալիս հաշվել i -րդ ալիքի P_i հզորությունը [3].

$$P_i = \frac{\left| \int_{S_1} [\vec{E}_0 \vec{H}_i] \cdot \vec{n} dS \right|^2}{\left| \int_S [\vec{E}_i \vec{H}_i] \cdot \vec{n} dS \right|^2}, \quad (1)$$

որտեղ S_1 -ը գրգռող ալիքատարի կտրվածքի արդյունավետ մակերեսն է; S -ը՝ ՄԴԱ-ի լայնական կտրվածքը; $\vec{I}$ -ը՝ Oz առանցքի ուղղությամբ միավոր վեկտորը, $\vec{E}_0$ -ը և $\vec{H}_0$ -ը՝ գրգռող ալիքի դաշտի բաղադրիչներ, որոնց արտահայտությունները բերված են [4]-ում: $\vec{E}_i$ -ը և $\vec{H}_i$ -ը՝ գրգռվող ալիքի դաշտի բաղադրիչներն են, որոնց արտահայտությունները բերված են [2]-ում:

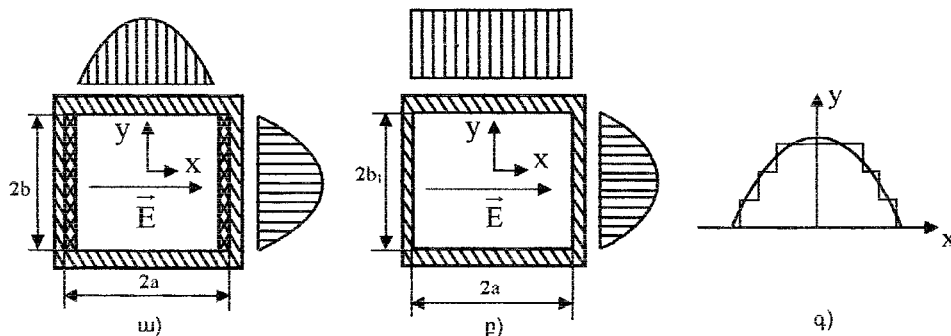
Ընկնող ալիքի հզորությունը հաշվարկվում է որպես S_1 մակերեսով Ումով-Պոյտինգի վեկտորի հոսքի իրական մաս.

$$P_0 = \operatorname{Re} \int_{S_1} [\vec{E}_0 \vec{H}_0^*] \cdot \vec{I} dS, \quad (2)$$

գրգռման արդյունավետությունը՝

$$\eta = P_i / P_0 : \quad (3)$$

Եթե գրգռող ալիքատարի ելքային կտրվածքում ձևավորվի դաշտի աստիճանաձև բաշխում, ապա մետաղա-դիէլեկտրիկական ալիքատարի գրգռման արդյունավետությունը կլինի այնքան մեծ, որքան այդ բաշխումը մոտ լինի կոսինուսիդալ բաշխմանը (նկ.1):



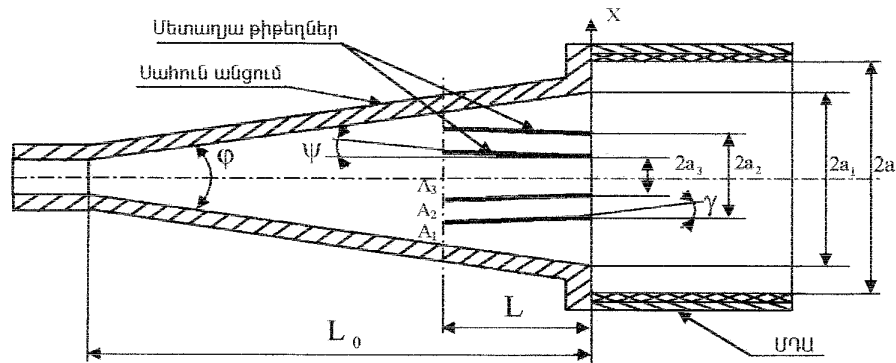
Նկ.1. Ալիքատարի լայնական կտրվածքում (ա) LM_{11} և (բ) H_{10} ալիքի դաշտի բաշխման էպյուրները; գ) ՄԴԱ-ի գրգռումն ալիքատարի լայն պատով H_{10} ալիքի դաշտի աստիճանաձև բաշխմամբ

H_{10} աշխատանքային ալիքով լայն մետաղական ալիքատարում այդպիսի բաշխում կարելի է ստանալ, եթե այդ ալիքատարը բաժանվի հինգ անցուղիների (նկ. 2). դաշտի A_1 և A_2 լայնություններով՝ երկու կողայինի և A_3 լայնությամբ՝ կենտրոնականի: Դրա համար բավական է գրգռիչի ելքային մասում տեղադրել փողի պատերի հետ էլեկտրական հպումով թիթեղներ:

Տեղադրելով LM_{11} և H_{10} ալիքների դաշտերի բաղադրիչների արտահայտությունները (3)-ի մեջ, կստանանք՝

$$\eta = \frac{8}{\pi^2} \frac{\left[A_1 \sin \frac{\pi a_1}{2a} + (A_2 - A_1) \sin \frac{\pi a_2}{2a} + (A_3 - A_2) \sin \frac{\pi a_3}{2a} \right]^2}{\frac{a_1}{a} A_1^2 + \frac{a_2}{a} (A_2^2 - A_1^2) + \frac{a_3}{a} (A_3^2 - A_2^2)}, \quad (4)$$

որտեղ a -ն, a_1 -ը, a_2 -ը և a_3 -ը ՄԴԱ-ի և գրգռիչի չափերն են (նկ. 2):



Նկ.2. ՄԴԱ գրգռիչի կառուցվածքը

Թերթիկների երկարությունը որոշվում է էներգիայի պահպանման օրենքով, վերջնական բանաձևն ունի հետևյալ տեսքը.

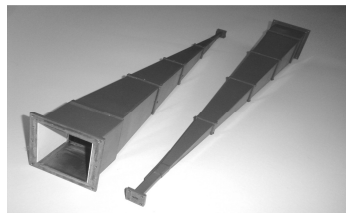
$$L = \frac{a_1 - a_2(1+k) + ka_3}{\operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} + (1+k)\operatorname{tg} \psi - k\operatorname{tg} \gamma}, \quad (5)$$

որտեղ $k = \frac{A_1^2}{A_2^2} \frac{a_1 - a_2}{a_2 - a_3}$:

Հայտնի է, որ ՄԴԱ-ի առավելություններն ի հայտ են գալիս, երբ նրա լայնական կտրվածքի $2a$ չափը հավասար է 7λ -ի [1]: LM₁₁ աշխատանքային ակիքի համար արդյունավետության առավելագույն արժեքը՝ $\eta_{\text{առվ}}=0,987$: Գրգռման արդյունավետության բանաձևի թվային հետազոտությունները ցույց են տվել, որ $\eta_{\text{առվ}}=0,987$, երբ $A_1=0,175$, $A_2=0,333$, $A_3=0,51$, $a_1/a=0,91$, $a_2/a=0,71$, $a_3/a=0,477$ և $b=b_1$:

Ստացված արդյունքների փորձնական հետազոտությունների համար պատրաստվել են երկու նմուշներ, որոնցում մետաղյա թերթիկները տեղադրված են միմյանց զուգահեռ, այսինքն՝ $\psi = \gamma = 0$: 25...27 ԳՀԳ հաճախային ընդգրկությամբ ՄԴԱ-ի լայնական կտրվածքն ընտրվել է 70×70 մմ² չափերով: Առաջին գրգռիչում բոլոր չափերն ընտրվել են արդյունավետության առավելագույն մեծությանը համապատասխանող արժեքներին հավասար:

Երկրորդում՝ միայն a_1 -ը և a_2 -ն են ընտրվել ըստ վերը նշված պայմանի: Երկու գրգռիչների երկարություններն ընտրվել են 765 մմ: Առաջին գրգռիչում գումարային կորուստները կազմել են 0,35 դԲ, երկրորդում՝ 0,45 դԲ: Գրգռիչների արտաքին տեսքը բերված է նկ. 3-ում: Երկու դեպքերում էլ չափման սխալանքը կազմել է 20%:



Նկ. 3. Գրգռիչների արտաքին տեսքը

Ինչպես երևում է ստացված արդյունքներից, հաշվարկային և փորձնական արժեքները բավականին լավ են համընկնում միմյանց: Մշակված գրգռիչը կարող է լայն կիրառություն գտնել տարբեր նշանակության ԳԲՀ սարքերում:

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. Техника субмиллиметровых волн / Под ред. проф. **Р.А. Валитова**. -М.: Сов. радио, 1969.-480с.
2. **Казанцев Ю. Н., Харлашкин О. А.** Прямоугольные волноводы класса «полый диэлектрический канал» // Радиотехника и электроника.-1978.-Т. 23, №10. - С. 2060-2068.
3. **Каценеленбаум Б.З.** Теория нерегулярных волноводов с медленно меняющимися параметрами. -М.: Изд. АН СССР, 1961. -216с.
4. **Вайштейн Л. А.** Электромагнитные волны. -М.: Сов. радио, 1957.-381 с.

ՀՊՃՀ: Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 05.07.2003:

Н.Г. СТЕПАНЯН

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТАЛЛО-ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВОЛНОВОДНОГО ВОЗБУДИТЕЛЯ

Рассмотрен новый способ высокоэффективного возбуждения металло-диэлектрического волновода. Показано, что при помощи металлических пластин, установленных в широкой части возбуждающего рупора с рабочей модой H_{10} , можно формировать распределение поля, близкое к распределению рабочей моды LM_{11} металло-диэлектрического волновода. Методом Фельд-Заксона рассчитана эффективность возбуждения рабочей моды LM_{11} , которая составила $\eta_{\max}=0,987$. Экспериментальные исследования возбуждителя проводились в диапазоне 25...27 ГГц. Получено хорошее совпадение расчетных и экспериментальных результатов.

N.G. STEPANYAN

INVESTIGATION OF METAL-DIELECTRIC WAVEGUIDE EXCITER

A new highly effective type of metal-dielectric exciter has been studied. It is shown that by means of metal plates set up in the broad part of stimulant loud-hailer with working mode H_{10} , it is possible to form a distribution field which is close to the distribution of metal-dielectric waveguides working mode LM_{11} . The efficiency of working mode excitation LM_{11} has been calculated by Feld-Zaxon method, which constitutes $\eta_{\max}=0,987$. Experimental researches of the exciter were held in the range of 25...27 GHz. A successful coincidence of the calculated and experimental results has been obtained.

Ջ.Ա. ՄԵԼԻՔՅԱՆ, Հ.Ս. ՂԱԶԱՐՅԱՆ

**ՍՏՈՐԳԵՏՆՅԱ ԳԱԶԱՀՈՐԵՐԻ ԼՑՄԱՆ ԳՈՐԾԸՆԹԱՑՈՒՄ ԳԱԶԻ
ՋԵՐՄԱՖԻԶԻԿԱԿԱՆ ԵՎ ՔԱՆԱԿԱԿԱՆ ՊԱՐԱՄԵՏՐԵՐԻ ՈՐՈՇՄԱՆ
ՄԵԹՈԴ**

Շարադրված է ստորգետնյա գազահորերի լցման գործընթացներում կուտակված գազի քանակական և ջերմատեխնիկական պարամետրերի ճշգրիտ որոշման նոր մեթոդ և դրա մաթեմատիկական մոդելը, որոնցում հաշվի են առնված մղող կոմպրեսորների ոչ ստացիոնար արտադրողականությունը, գազահորում կուտակվող գազի ջերմաստիճանի և այլ պարամետրերի փոփոխականությունը, կուտակվող գազի և հորը շրջապատող գրունտային զանգվածի միջև տեղի ունեցող ոչ ստացիոնար ջերմափոխանակությունը մղման խողովակագծերում ու հորանում:

Առանցքային բառեր: ստորգետնյա գազահոր, կոմպրեսորային կայանք, պարամետր, զանգված, ջերմաստիճան, ճնշում, խտություն, հորան, գրունտային զանգված, արտադրողականություն, բազմաստիճանային սեղմում, բուֆերային գազ:

Զմեռային պայմաններում կտրուկ մեծանում է բնական գազի սպառումը, ինչը հանգեցնում է նրա մատակարարման անհավասարաչափության: Դրանից խուսափելու համար կիրառվում են ստորգետնյա գազահորեր, որոնցում ամառային պայմաններում մատուցվող ավելցուկային գազը կոմպրեսորների օգնությամբ սեղմվում և պահվում է բարձր ճնշման տակ՝ ձմռանն օգտագործելու նպատակով: Նման գազահորեր գոյություն ունեն նաև Երևանում:

Գազահորերի արդյունավետ շահագործումը պահանջում է դրանց լցման գործընթացում ճշգրիտ գնահատել գազի ջերմաֆիզիկական և քանակական պարամետրերը՝ ջերմաստիճանը, ճնշումը, խտությունը, կուտակված գազի իրական զանգվածը և այլն: Այս մեծությունների վերլուծական որոշման մեթոդներ ներկայումս, ըստ էության, գոյություն չունեն, իսկ գոյություն ունեցող նյութերը, քանակական խոշորացված բնութագրեր են, որոնք հիմնականում որոշվում են չափումների միջոցով: Գազի գների սպասվող կտրուկ աճի պայմաններում կարևոր խնդիր է դառնում գազահորերում պահվող գազի ճշգրիտ քանակների որոշումը: Քանի որ հայտնի մեթոդները չեն ապահովում բավարար ճշգրտություն, անհրաժեշտ է դառնում մշակել ճշգրտված մեթոդ, որը հնարավորություն կընձեռի վերլուծական եղանակով հաշվարկել վերը նշված պարամետրերը:

Ստորգետնյա գազահորերում գազի քանակական և որակական պարամետրերի որոշման մեթոդի ընդհանուր դրույթները: Ժամանակի ընթացիկ պահին դեպի գազահոր մղված և կուտակված գազի քանակը որոշվում է

$$G_{\text{Հոր}} = G_{\text{բուֆ}} + G_{\text{կ}} \cdot \tau \quad (1)$$

արտահայտությամբ, որտեղ $G_{\text{բուֆ}}$ -ը գազահորում մինչև լցումը պահվող բուֆերային գազի զանգվածն է, կգ, $G_{\text{կ}}$ -ն՝ կոմպրեսորի արտադրողականությունը, կգ/ժամ, τ -ն՝ ընթացիկ ժամանակը, ժ:

Ստորգետնյա պահեստարաններում պահվող գազի $G_{\text{Հոր}}$, կգ, քանակության որոշման համար կիրառվում է իրական գազի վիճակի թերմոդինամիկական հավասարումը՝

$$G_{\text{Հոր}} = \frac{P_{\text{Հոր}} V_{\text{Հոր}}}{Z_{\text{Հոր}} R T_{\text{Հոր}}} , \quad (2)$$

որտեղ $P_{\text{Հոր}}$ -ը գազի ճնշումն է լցման գործընթացի վերջում, $\mathcal{W}$, $V_{\text{Հոր}}$ -ը՝ հորի ֆիզիկական ծավալը, $\mathcal{U}^3$, $Z_{\text{Հոր}}$ -ը՝ հորում կուտակվող գազի սեղմելիության գործակիցը, R -ը՝ բնական գազի գազային հաստատունը, $\mathcal{W}/q$, K , $T_{\text{Հոր}}$ -ը՝ գազի ջերմաստիճանը լցման գործընթացի վերջում, K :

Կիրառվող (2) հավասարման օգնությամբ $G_{\text{Հոր}}$ -ն որոշվում է ըստ տրված $P_{\text{Հոր}}$ -ի՝ ընդունելով, որ գազի ջերմաստիճանը հավասար է հորը շրջապատող գրունտային զանգվածի ջերմաստիճանին՝ լցման գործընթացի ամբողջ ընթացքում:

Սակայն ակնհայտ է, որ լցման գործընթացի ընթացքում հորում կուտակվող գազի վրա կատարվող մղման աշխատանքի, ինչպես նաև կուտակվող գազի և գրունտային անսահմանափակ զանգվածի միջև ջերմափոխանցման հետևանքով գազի ներքին էներգիան, հետևաբար և ջերմաստիճանը, լցման գործընթացի ընթացքում փոփոխվում են: Հայտնի մեթոդում այս գործընթացի ոչ ստացիոնարության հաշվի չառնելը հանգեցնում է հաշվարկային արդյունքների լուրջ սխալների:

Քանի որ գազի և՛ ճնշումը, և՛ ջերմաստիճանը լցման գործընթացի ընթացքում փոփոխվում են, ապա պահվող գազի զանգվածը նույնպես փոփոխական է ժամանակի ընթացքում:

Գազահորերի լցման ոչ ստացիոնար գործընթացը բնութագրելու համար ելնում ենք զանգվածի և էներգիայի պահպանման օրենքներից:

Զանգվածի պահպանման օրենքը ժամանակի ընթացիկ պահին ունի հետևյալ տեսքերը.

$$G_{\text{Հոր}} = G_{\text{բուֆ}} + \int_0^{\tau} G_{\text{կ}} d\tau \quad \text{կամ} \quad G_{\text{կ}} = \frac{dG_{\text{Հոր}}}{d\tau} : \quad (3)$$

Էներգիայի պահպանման օրենքը հիմնվում է թերմոդինամիկայի առաջին օրենքի վրա և գրվում է հետևյալ կերպ.

$$dQ_{(\tau)} = dU_{(\tau)} - \sum dU_{(\tau)} + dL_{(\tau)} , \quad (4)$$

որտեղ $dQ_{(0)}$ -ն ջերմության քանակն է, որն անցնում է գազից գրունտային զանգվածին կամ հակառակը, $\mathcal{Q}$, $dU_{(\tau)}$ -ն՝ խառնուրդի ներքին էներգիան, $\mathcal{W}/q$, $\Sigma dU_{(\tau)}$ -ն՝ գազերի ներքին էներգիաների հանրահաշվական գումարը խառնուրդից առաջ, $\mathcal{W}/q$, $dL_{(\tau)}$ -ն՝ գազերի կատարած աշխատանքների հանրահաշվական գումարը (սեղմման աշխատանք, որը կատարում է տրվող գազը հորում եղած գազի վրա):

Ժամանակի τ ընթացիկ պահին գազահորում $G_{\text{Հոր}}$ գազի զանգվածի ներքին էներգիան կարելի է որոշել $U_{(\tau)} = c_v G_{\text{Հոր}} T_{\text{Հոր}}$ արտահայտությամբ:

Հորում գազի զանգվածը և ջերմաստիճանը որոշակի d (ժամանակահատվածում համապատասխանաբար հավասար կլինեն ($G_{\text{Հոր}}+dG_{\text{Հոր}}$) և ($T_{\text{Հոր}}+dT_{\text{Հոր}}$):

Հետևաբար, լցման գործընթացի ընթացիկ յուրաքանչյուր հաջորդ պահին խառնուրդի ներքին էներգիան՝

$$U_{(\tau+d\tau)} = c_v (G_{\text{Հոր}} + dG_{\text{Հոր}}) \cdot (T_{\text{Հոր}} + dT_{\text{Հոր}}) :$$

$$\text{Այսպիսով, (4) հավասարման մեջ } dU_{(0)} \text{ -ն կորոշվի}$$

$$dU_{(\tau)} = U_{(\tau+d\tau)} - U_{(\tau)} = c_v (G_{\text{Հոր}} + dG_{\text{Հոր}}) \cdot (T_{\text{Հոր}} + dT_{\text{Հոր}}) - c_v G_{\text{Հոր}} T_{\text{Հոր}}$$

արտահայտությամբ:

Ակնհայտ է, որ ժամանակի $d\tau$ հատվածում ներքին էներգիայի փոփոխությունը տեղի է ունենում լցվող գազի հետ բերվող էներգիայի հաշվին, որը որոշվում է

$$U_{\tau, l} = c_v G_l T_x d\tau$$

արտահայտությամբ:

Բացի դրանից, լցվող գազի կողմից հորում գտնվող գազի վրա կատարվում է աշխատանք, որի մեծությունը հաշվարկելու համար օգտվում ենք հետևյալ բանաձևից.

$$dL = -Rc_v G_l T_x d\tau :$$

Ստացված արտահայտությունները տեղադրելով (4) հավասարման մեջ, ստանում ենք՝

$$dQ_{(\tau)} = c_v (G_{\text{չոր}} + dG_{\text{չոր}}) \cdot (T_{\text{չոր}} + dT_{\text{չոր}}) - c_v G_{\text{չոր}} T_{\text{չոր}} - c_v G_l T_x d\tau - R G_l T_x d\tau = c_v G_{\text{չոր}} T_{\text{չոր}} + c_v G_{\text{չոր}} dT_{\text{չոր}} + c_v dG_{\text{չոր}} T_{\text{չոր}} + c_v dG_{\text{չոր}} dT_{\text{չոր}} - c_v G_{\text{չոր}} T_{\text{չոր}} - c_v G_l T_x d\tau - R G_l T_x d\tau :$$

Անտեսելով $c_v dG_{\text{չոր}} dT_{\text{չոր}}$ երկրորդ կարգի անսահման փոքր մեծությունը, (4) հավասարումը որոշ ձևափոխություններից հետո ներկայացվում է հետևյալ տեսքով.

$$dQ_{(\tau)} = c_v G_{\text{չոր}} dT_{\text{չոր}} + c_v (T_{\text{չոր}} + kT_x) G_l d\tau , \quad (5)$$

որտեղ c_v –ն պահվող գազի միջին տեսակարար ջերմունակությունն է իզոխոր գործընթացում, $\mathcal{Q}/\mathcal{Q} K$, k -ն՝ ադիաբատի ցուցիչը մեթան գազի համար, T_x -ը՝ գազահոր մտնող գազի ջերմաստիճանը, K :

Նախնական հետազոտությունները հիմնավորում են, որ մեթոդի բարձր ճշգրտության ապահովման համար պետք է մշակվի ամբողջ համակարգի մաթեմատիկական մոդելը և դրանում պետք է հաշվի առնվեն մեծ թվով գործոններ, որոնք խիստ ազդում են կուտակված գազի պարամետրերի վրա: Ըստ նախնական գնահատման, վերջիններս դասակարգվում են հետևյալ բլոկների ձևով:

1. Գազահորերի լցման գործընթացի ընթացքում հորի ճնշման անընդհատ մեծացման պատճառով կոմպրեսորների ոչ ստացիոնար արտադրողականության օրինաչափությունների մաթեմատիկական նկարագրությունը,

2. Գազահորում կուտակվող գազի ջերմաստիճանի փոփոխականությունը և, դրանից կախված, քանակության ֆլուկտուացիան,

3. Կուտակվող գազի և հորը շրջապատող գրունտային զանգվածի միջև տեղի ունեցող ոչ ստացիոնար ջերմափոխանակությունը,

4. Գազի պարամետրերի փոփոխականությունը մղման խողովակագծերում և փողում սեղմման ոչ ստացիոնար գործընթացում:

Նշված բոլոր բլոկների ազդեցությունը կուտակվող գազի ջերմաֆիզիկական և քանակական պարամետրերի վրա ճշգրիտ հաշվի առնելու համար պետք է նրանց փոխկապակցել մեկ ընդհանուր մաթեմատիկական մոդելի մեջ:

Գազահորերի լցման ոչ ստացիոնար գործընթացի ընթացքում կոմպրեսորների արտադրողականության փոփոխությունը հորի ճնշման անընդհատ մեծացման պատճառով: Լցման ընթացքում հորում անընդհատ մեծացող ճնշումը հանգեցնում է կոմպրեսորի ծավալային կորուստների ինդիկատորային և տաքացման գործակիցների փոքրացման, որի հետևանքով կոմպրեսորի արտադրողականությունն ըստ ժամանակի նույնպես փոքրանում է: Նշված ոչ ստացիոնար արտադրողականությունն արտահայտվում է

$$G_{\text{կ}} = f_1(\tau) = \frac{V_{\text{մխ}} \cdot \lambda_{(\tau)}}{V_{\text{մեր}}} \quad (6)$$

բանաձևով, որտեղ $G_{\text{կ}}$ –ն կոմպրեսորի արտադրողականությունն է ժամանակի տվյալ պահին, կգ/վ , τ –ն՝ հորի լցման ընթացիկ ժամանակը, վրկ , $V_{\text{մխ}}$ –ը՝ կոմպրեսորի մխոցի զծած ծավալը, $\text{մ}^3/\text{վրկ}$, $V_{\text{մեր}}$ –ը՝ կոմպրեսորի մուտքում ներածվող գազի տեսակարար ծավալը, $\text{մ}^3/\text{կգ}$:

$\lambda_{(\tau)}$ –ն կոմպրեսորի մղման գործակիցն է, որը հաշվի է առնում բոլոր ծավալային կորուստները կոմպրեսորում և որոշվում է

$$\lambda_{(\tau)} = \lambda_{i(\tau)} \lambda_{w(\tau)} \lambda_H \quad (7)$$

արտադրյալով, որտեղ $\lambda_{i(\tau)}$ –ը, $\lambda_{w(\tau)}$ –ը և λ_H –ը համապատասխանաբար, կոմպրեսորի ինդիկատորային, տաքացման և արտաքին ծավալային կորուստների գործակիցներն են [1]:

Ըստ հետազոտությունների արդյունքների, կոմպրեսորի մղման ($\circ$) գործակիցը գնահատվում է

$$\lambda_{(\tau)} = \frac{T_{\text{մեր}}}{P_{\text{մեր}} \cdot T_{\text{կ}}} \cdot \lambda_H \cdot ((P_{\text{մեր}} - \Delta P_{\text{մեր}})(1+c) - c(P_{\text{կ}} - \Delta P_{\text{մղ}})) \quad (8)$$

արտահայտությամբ, որտեղ $P_{\text{մեր}}$ –ը ճնշումն է կոմպրեսորի մուտքում, Պա, $P_{\text{կ}}$ –ն՝ ճնշումը կոմպրեսորի ելքում, Պա, $(P_{\text{մեր}}$ –ը և $(P_{\text{մղ}}$ –ը՝ ճնշման կորուստները ներածման և մղման կափույրներում, Պա, $T_{\text{մեր}}$ –ը և $T_{\text{կ}}$ –ը՝ գազի բացարձակ ջերմաստիճանները կոմպրեսորի մուտքում և ելքում, K, c–ն՝ կոմպրեսորի հարաբերական մեռյալ ծավալը:

Որպես կանոն, գազահորերի լցման կոմպրեսորներն ունեն եռաստիճանային սխեմայով հաջորդաբար միացում, որի դեպքում գազի ճնշումն առաջին կոմպրեսորի ելքում փոփոխվում է և կախված է երրորդ կոմպրեսորի ելքում գազի ճնշման փոփոխությունից:

Հաշվի առնելով ճնշումների նշված փոխկախվածությունը, ինչպես նաև գազի պայն հիդրոստատիկ ճնշումը հորի ողղաձիգ փողում (gH , Պա, ճնշման կորուստները կոմպրեսորներից մինչև հոր մղման խողովակաշարում $\Delta P_{\text{շ}}$, Պա, հորի ողղաձիգ հորան ($P_{\text{փող}}$, Պա, և եռաստիճան հաջորդական միացման դեպքում, կոմպրեսորի $G_{\text{կ}}$, կգ/վրկ արտադրողականության որոշման համար, ստացվել է

$$G_{\text{կ}} = \frac{V_{\text{մխ}} T_{\text{մեր}}}{P_{\text{մեր}} V_{\text{մեր}} T_{\text{կ}}} \lambda_H \cdot ((P_{\text{մեր}} - \Delta P_{\text{մեր}})(1+c) + c \Delta P_{\text{կ}}) - \frac{V_{\text{մխ}} T_{\text{մեր}}}{P_{\text{մեր}} V_{\text{մեր}} T_{\text{կ}}} c \cdot \lambda_H \times \\ \times \left(\frac{Z_{\text{շոք}} R_{\text{շոք}}}{V_{\text{շոք}}} G_{\text{շոք}} T_{\text{շոք}} - \rho gH + 0.241 \frac{c \cdot v^{0.25} (H \cdot d_{\text{շլ}}^{4.75} + L \cdot d_{\text{փող}}^{4.75})}{\rho^{0.75} \cdot d_{\text{փող}}^{4.75} \cdot d_{\text{շլ}}^{4.75}} \cdot G_{\text{կ}}^{1.75} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot P_{\text{մեր}}^{\frac{2}{3}} \quad (9)$$

արտահայտությունը, որտեղ $G_{\text{շոք}}$ –ը գազահորում կուտակված գազի զանգվածն է լցման գործընթացի վերջում, կգ , v –ն՝ գազի կինեմատիկ մածուցիկության գործակիցը, $\text{մ}^2/\text{վրկ}$, H –ը՝ ողղաձիգ փողի երկարությունը, մ , L –ը՝ մղման խողովակազծի երկարությունը, մ , ρ –ն՝ գազի խտությունը, կգ/մ^3 , $d_{\text{շլ}}$ –ն՝ կոմպրեսորներից մինչև հոր մղման խողովակաշարի տրամագիծը, մ , $d_{\text{փող}}$ –ը՝ գազահորի փողի տրամագիծը, մ :

Վերջին արտահայտության մեջ գազի ճնշման կորուստներն որոշումը կատարվել է Դարսի-Վեյսբախի, Բլազիուսի բանաձևերի կիրառմամբ, որոնցում գազի հոսքի տարբեր արագությունները որոշվել են Ռեյնոլդսի կրիտերիալ հավասարման միջոցով:

$$\begin{aligned}
\text{Նշանակելով } B_1 &= \frac{V_{\text{մխ}} T_{\text{մեր}}}{P_{\text{մեր}} V_{\text{մեր}} T_{\text{լ}}} \lambda_{\text{H}} \cdot ((P_{\text{մեր}} - \Delta P_{\text{մեր}})(1+c) + c \Delta P_{\text{լ}}), \\
B_2 &= \frac{V_{\text{մխ}} T_{\text{մեր}}}{P_{\text{մեր}}^{\frac{1}{3}} \cdot V_{\text{մեր}} T_{\text{լ}}} c \cdot \lambda_{\text{H}}, \quad B_3 = \frac{Z_{\text{չոք}} R_{\text{չոք}}}{V_{\text{չոք}}}, \quad B_4 = \rho g H \quad \text{և} \\
B_5 &= 0.241 \frac{c \cdot v^{0.25} (H \cdot d_{\text{Շլ}}^{4.75} + L \cdot d_{\text{Փող}}^{4.75})}{\rho^{0.75} \cdot d_{\text{Փող}}^{4.75} \cdot d_{\text{Շլ}}^{4.75}},
\end{aligned}$$

Կոմպրեսորի արտադրողականության որոշման (9) հավասարումը կստանա հետևյալ տեսքը.

$$G_{\text{լ}} = B_1 - B_2 (B_3 \cdot G_{\text{չոք}} T_{\text{չոք}} - B_4 + B_5 \cdot G_{\text{լ}}^{1.75})^{\frac{1}{3}}: \quad (10)$$

Կոմպրեսորի $G_{\text{լ}}$ արտադրողականության որոշման համար ստացված իռացիոնալ (10) հավասարումը կարելի է լուծել մոտարկման եղանակով՝ ‘Մաթեմատիկա-5’ ծրագրի օգնությամբ: Կոմպրեսորի $G_{\text{լ}}$ արտադրողականության փոփոխման օրինաչափությունն ըստ հորի լցման ժամանակի (հաշվարկված (10) հավասարման միջոցով) պատկերված է նկ.1-ում:

Գազահորում կուտակվող գազի ջերմաստիճանի և քանակության փոփոխությունն արտահայտում ենք

$$G_{\text{չոք}} \frac{dT_{\text{չոք}}}{d\tau} + G_{\text{լ}} (T_{\text{չոք}} - kT_{\text{X}}) = Q_{\text{զր}}$$

հավասարման միջոցով:

Ջերմային հոսքը, որը փոխանցվում է գազից գրունտին, կարելի է որոշել հետևյալ բանաձևով [2].

$$dQ = \pi(T_{\text{չոք}} - T_{\text{o}})d\tau / \left\{ \frac{1}{\alpha \cdot d^2} + \frac{1}{2\lambda_{\text{զր}}} \left(\frac{1}{d} - \frac{1}{d + 2\delta_{(\tau)}} \right) \right\}, \quad (11)$$

որտեղ α -ն ջերմատվության գործակիցն է հորում գազի և գրունտային զանգվածի մակերևույթի միջև, $\nu_{\text{մխ}}/\text{մ}^2 \text{K}$, d -ն՝ հորի տրամագիծը, $\lambda_{\text{զր}}$ -ը՝ գրունտային զանգվածի ջերմահաղորդականության գործակիցը, $\nu_{\text{մխ}}/\text{մ} \text{K}$, δ -ն՝ T_{o} նախնական իզոթերմիկ մակերևույթի ճակատի տեղափոխումը ժամանակի ընթացքում՝ ի հաշիվ գազ-գրունտային զանգված ջերմափոխանակության, $\lambda_{\text{զր}}$, T_{o} -ն՝ գազահորի մակերևույթի ջերմաստիճանը մինչև լցումը, K :

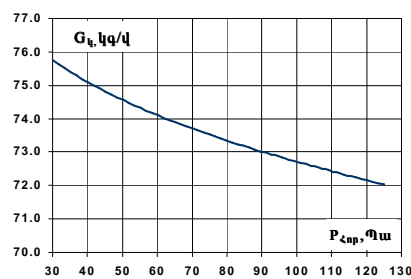
Քանի որ գազահորերում ջերմափոխանցումը գազի և գրունտային զանգվածի միջև իրականացվում է ազատ կոնվեկցիայով, ապա α ջերմատվության գործակիցը կարելի է որոշել հավասարմամբ:

$$\alpha = 0.105 \left(\frac{c_p \lambda^2 \rho g (T_{\text{h}} - T_{\text{չոք}})}{\nu T_{\text{չոք}}} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (12)$$

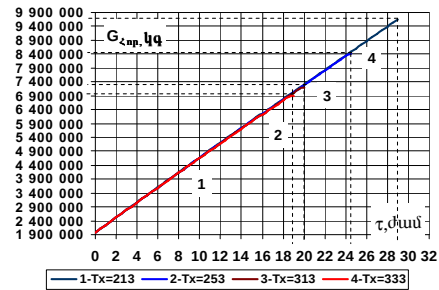
Մղման խողովակագծերում և հորանում սեղմման ոչ ստացիոնար գործընթացում գազի ջերմաստիճանի փոփոխության որոշման համար ստացել ենք հետևյալ հավասարումը.

$$T_x = T_{qH} + 0,033 \left[H - \frac{c_p \left(\frac{1}{\alpha d} + \frac{1}{2\lambda_{qp}} \ln \frac{d + 4\sqrt{a_{qp} \cdot \tau}}{d} \right) \frac{dG_{hnp}}{d\tau}}{\pi} \right] + (T_{xH} - T_{qH} + 0,033 c_p \left(\frac{1}{\alpha d} + \frac{1}{2\lambda_{qp}} \ln \frac{d + 4\sqrt{a_{qp} \cdot \tau}}{d} \right) \frac{dG_{hnp}}{d\tau}) \times \exp \left(\frac{-\pi H}{c_p \left(\frac{1}{\alpha d} + \frac{1}{2\lambda_{qp}} \ln \frac{d + 4\sqrt{a_{qp} \cdot \tau}}{d} \right) \frac{dG_{hnp}}{d\tau}} \right), \quad (13)$$

որտեղ c_p -ն պահվող գազի միջին տեսակարար ջերմունակությունն է իզոբար գործընթացում, α -ն՝ ջերմատվության գործակիցը գազի և հորանը շրջապատող գրունտային զանգվածի միջև, $\sqrt{a_{qp}}/K$, d -ն՝ փողի տրամագիծը, α_{qp} -ը, λ_{qp} -ը՝ գրունտի ջերմատվականահաղորդականության և ջերմահաղորդականության գործակիցները, d^2/χ , $\sqrt{a_{qp}}/K$:



Նկ.1: Կոմպրեսորի արտադրողականության G_k , կգ/վ, կախվածությունը հորում գազի փոփոխական ճնշումից $P_{ср}$, Պա



Նկ.2: Գազահոր լցվող գազի քանակի $G_{ср}$, կգ, փոփոխության գրաֆիկը՝ կախված հորի լցման ժամանակամիջոցից, τ , ժամ, և գազի ջերմաստիճանից հորի մուտքում, T_x , °K

Ջերմատվության α գործակիցը կախված է բազմաթիվ գործոններից, մասնավորապես կոմպրեսորի արտադրողականությունից: Այդ պատճառով վերջինիս որոշման համար օգտվել ենք նմանության տեսության Նյուտոնի, Ռեյնոլդսի, Պրանդտլի կրիտերիալ հավասարումներից և ստացել հետևյալ արտահայտությունը.

$$\alpha = \frac{0,0254 \cdot \lambda}{d^{1.8} \cdot \rho^{0.8} \cdot \nu^{0.37} \cdot a^{0.43}} \left(\frac{dG_{hnp}}{d\tau} \right)^{0.8} : \quad (14)$$

Վերոհիշյալ հավասարումների համակարգի լուծման միջոցով ստացվել է հետևյալ արտահայտությունը, որը հնարավորություն է տալիս հաշվարկելու հորում կուտակվող գազի քանակությունը G_{hnp} լցման գործընթացում բոլոր պարամետրերի և հորի կոնստրուկտիվ բնութագրերի փոփոխական արժեքների դեպքում.

$$\frac{d^2 G_{\text{չոք}}}{d\tau^2} + \left[\frac{B_2^3 B_3 \cdot k T_x}{3B_1^2 - 6B_1 \left(\frac{dG_{\text{չոք}}}{d\tau} \right) + 3 \left(\frac{dG_{\text{չոք}}}{d\tau} \right)^2 + 1.75 B_2^3 B_5 \cdot \left(\frac{dG_{\text{չոք}}}{d\tau} \right)^{0.75}} - \frac{\pi}{G_{\text{չոք}} C_v \left(\frac{1}{\alpha d^2} + \frac{2\sqrt{a_{\text{գր}} \cdot \tau}}{d\lambda_{\text{գր}} (d + 4\sqrt{a_{\text{գր}} \cdot \tau})} \right)} \right] \times$$

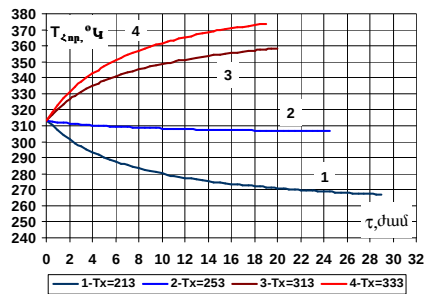
$$\left(\frac{3B_1^2 + 3B_1 \left(\frac{dG_{\text{չոք}}}{d\tau} \right) - \left(\frac{dG_{\text{չոք}}}{d\tau} \right)^2 + B_2^3 B_5 \cdot \left(\frac{dG_{\text{չոք}}}{d\tau} \right)^{0.75}}{3B_1^2 - 6B_1 \left(\frac{dG_{\text{չոք}}}{d\tau} \right) + 3 \left(\frac{dG_{\text{չոք}}}{d\tau} \right)^2 + 1.75 B_2^3 B_5 \cdot \left(\frac{dG_{\text{չոք}}}{d\tau} \right)^{0.75}} \right) \left(\frac{dG_{\text{չոք}}}{d\tau} \right) = \frac{\pi}{\left(\frac{1}{\alpha d^2} + \frac{2\sqrt{a_{\text{գր}} \cdot \tau}}{d\lambda_{\text{գր}} (d + 4\sqrt{a_{\text{գր}} \cdot \tau})} \right)} \times$$

$$\times \frac{(B_2^3 B_3 \cdot G_{\text{չոք}} T_0 - B_1^3 - B_4 B_2^3)}{G_{\text{չոք}} C_v \left(3B_1^2 - 6B_1 \left(\frac{dG_{\text{չոք}}}{d\tau} \right) + 3 \left(\frac{dG_{\text{չոք}}}{d\tau} \right)^2 + 1.75 B_2^3 B_5 \cdot \left(\frac{dG_{\text{չոք}}}{d\tau} \right)^{0.75} \right)}, \quad (15)$$

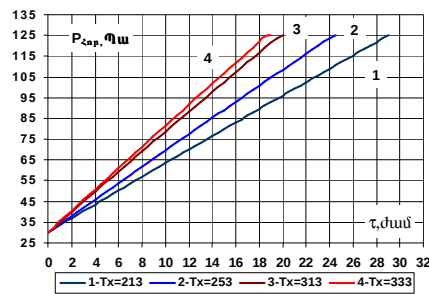
Ստացված (15) հավասարման լուծման համար անհրաժեշտ է օգտագործել հաշվիչ տեխնիկա, որի համար մշակվել է հաշվարկային ծրագիր՝ օգտագործելով ‘Մաթեմատիկա-5’ և ‘C++’ ծրագրային ապահովումները: Կուտակված գազի իրական քանակի $G_{\text{հոք}}$, նրա ջերմաստիճանի և ճնշման փոփոխություններն ըստ լցման գործընթացի տևողության τ , ժամ հաշվարկների արդյունքները, որոնք կատարվել են Երևանի $V=100000\text{մ}^3$ ծավալով ստորգետնյա գազահորերի պարամետրերի օրինակով, ներկայացված են գրաֆիկներով (նկ. 2,3,4):

Նկ.1-ի վերլուծությունն ապացուցում է, որ գազի մղման կոմպրեսորի արտադրողականությունը հորի լցման ընթացքում անընդհատ փոքրանում է, որի հաշվի առնելը հնարավորություն է տալիս ճշգրիտ որոշելու հորում վերջնական ճնշման՝ 125 մթն.-ին հասնելու ժամանակամիջոցը: Նկ.2-ում պատկերված է դեպի հոր մղված գազի իրական քանակությունը և լցման ժամանակամիջոցը: Ընդ որում, որքան ավելի ցածր է դեպի հոր մղվող գազի T_x ջերմաստիճանը, այնքան ավելի երկար է տևում լցման գործընթացը, որին համապատասխան չափով էլ մեծ է լինում կուտակված գազի զանգվածը $G_{\text{հոք}}$, կգ: Այս դրույթից հետևում է կարևոր եզրակացություն. տրված հաստատուն ծավալում կարելի է մղվող գազի զանգվածը մեծացնել, եթե գազը ենթարկվի նախնական սառեցման: Օրինակ՝ մղվող գազի նախնական $T_x=333\text{ K}$ ջերմաստիճանի տակ կուտակված գազի զանգվածը, համեմատած $T_x=213\text{ K}$ -ի հետ, մեծ է մոտ 27,8%-ով: Վերջինս հուշում է այն մասին, որ ստորգետնյա գազահորերի լցման գործընթացը նպատակահարմար է կազմակերպել դեպի հոր մղվող գազի նախնական սառեցման նոր տեխնոլոգիական գործընթացով:

Նկ.3-ում պատկերված է գազի ջերմաստիճանի փոփոխությունը հորի մեջ նրա լցման գործընթացում, ըստ ժամանակի: Գրաֆիկից հետևում է, որ հորում գազի սկզբնական ջերմաստիճանը, որն ընդունված է $T_0=313\text{ K}$, փոփոխվում է տարբեր օրինաչափություններով՝ կախված գազի T_x սկզբնական ջերմաստիճանից: Պարզվում է, որ կա մի ($T_x=256\text{ K}$) ջերմաստիճան, որի դեպքում հորի գազի ջերմաստիճանը համարյա չի փոխվում ամբողջ լցման գործընթացի ընթացքում: Դրանից մեծ T_x ջերմաստիճանների դեպքում հորի գազը տաքանում է, իսկ փոքրի դեպքում՝ սառչում: Նկ.4-ում ներկայացված է հորում գազի ճնշման փոփոխման դինամիկական լցման գործընթացի ընթացքում՝ կախված T_x ջերմաստիճաններից:



Նկ.3: Գազահորում գազի $T_{\text{հոր}}, ^\circ\text{C}$, ցերմաստիճանի փոփոխության գրաֆիկ՝ կախված հորի լցման τ , ժամ, ժամանակից և գազի ցերմաստիճանից հորի մուտքում, $T_x, ^\circ\text{K}$



Նկ.4: Գազահորում գազի $P_{\text{հոր}}, \text{MPa}$, ճնշման փոփոխության գրաֆիկ՝ կախված հորի լցման τ , ժամ, ժամանակից և գազի ցերմաստիճանից հորի մուտքում, $T_x, ^\circ\text{K}$

Հետազոտման արդյունքում կազմված այս գրաֆիկները կիրառելի են գազահորերի լցման գործընթացում պարամետրերի ճշգրիտ որոշման, հետևաբար և՛ հորերի նախագծման ու շահագործման գործընթացներում:

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. **Кондрашова Н.Г.** Холодильно-компрессорные машины и установки. – М.: Высшая школа, 1973. – С. 109-113..
2. **Меликян З.А.** Централизованное теплохладоснабжение гражданских и промышленных сооружений. -М.: Стройиздат, 1985. – 145 с.

ԵրՃԾՊՀ: Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 27.11.2003 :

З.А. МЕЛИКЯН, А.С. КАЗАРЯН

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ И КОЛИЧЕСТВЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ ГАЗА В ПРОЦЕССЕ НАГНЕТАНИЯ В ПОДЗЕМНОЕ ГАЗОХРАНИЛИЩЕ

Изложены метод и математическая модель для точного определения количественно-теплофизических параметров газа, аккумулированного в подземном хранилище, с учетом нестационарности производительности нагнетающих компрессоров, изменения температуры хранимого газа во времени, нестационарного теплообмена газа с окружающим грунтовым массивом и изменения параметров газа в горизонтальном шлейфе и вертикальной шахте подачи.

Z.A. MELIKYAN, H.S. GHAZARYAN

METHOD FOR DETERMINING GAS THERMAL-PHYSICAL AND QUANTITATIVE PARAMETERS IN THE COURSE OF ITS INJECTION INTO UNDERGROUND GAS STORE

A method and simulation model for determining correct values of thermal-physical and quantitative parameters of gas, stored in the underground gas store are proposed. In the model non-stable capacity of injecting compressors, change of temperature and other parameters of stored gas, non-stable heat exchange between the stored gas and surrounding ground massif are taken into account.

Э.А. АКОПЯН, В.С. ОВСЕПЯН

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПЕРЕМЕННО-ПОСТОЯННОГО ТОКА В ДВИГАТЕЛЬНОМ РЕЖИМЕ

Приведено математическое описание системы тягового электропривода переменного постоянного тока. Показана существенная нелинейность полученной системы дифференциальных уравнений, что обусловлено обмотками якоря и возбуждения.

Ключевые слова: модель, двигатель постоянного тока, нелинейность, автономная нагрузка, дифференциальные уравнения.

В настоящее время в тяговых электроприводах карьерных автосамосвалов с колесными формулами 4x2 и 4x4 наиболее предпочтительным является применение двух трехфазных однофазных выпрямителей [1,2]. При этом выходные зажимы их могут быть соединены как последовательно, так и параллельно. Выходные зажимы каждого выпрямителя подключаются к тяговому синхронному генератору (СГ), который имеет две независимые и сдвинутые относительно друг друга на 30° эл. трехфазные системы обмоток. Такие схемы системы "СГ-В" позволяют существенно снизить пульсации выходного напряжения энергоустановки, а также, как показано в [3], пульсации момента, развиваемого тяговыми двигателями постоянного тока (ДПТ). При этом обеспечивается также движение автосамосвала при аварийном выходе из строя одного из выпрямителей. Применением рассматриваемой схемы исключается необходимость в сглаживающих фильтрах и упрощается схема защиты вентиля.

На основании вышеуказанного для математического описания двигательного режима работы привода приняты следующие допущения:

- двигатели М1 и М2 идентичны;
- выпрямленные напряжения равны;
- фазные сопротивления коммутации со стороны переменного тока одинаковы в обеих системах обмоток синхронного генератора.

По схеме замещения, показанной на рис.1, с учетом вышеприведенных допущений математическое описание динамического процесса преобразования энергии с ДПТ с последовательным возбуждением в тяговом режиме без ослабления поля имеет следующий вид:

$$(L_{\text{ОЯ}}(i_{\text{Я}}) + L_{\text{ВМ}}(i_{\text{Я}})) \frac{di_{\text{Я}}}{dt} = U_{\text{д}} - (R_{\text{ОЯ}} + R_{\text{ВМ}})i_{\text{Я}} - k\omega L_{\text{ВМ}}(i_{\text{Я}})i_{\text{Я}}, \quad (1)$$

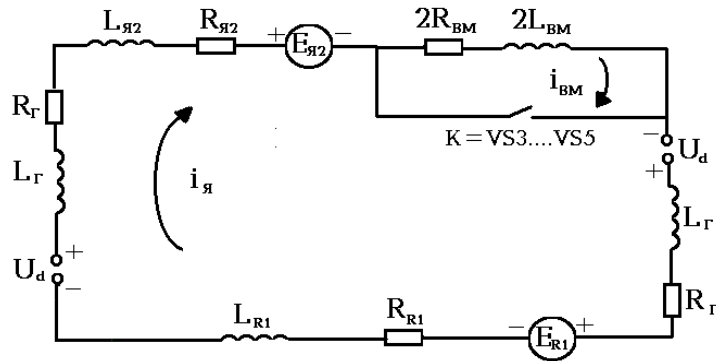


Рис.1

$$\frac{d\omega}{dt} = 2 \frac{k}{I} L_{\text{ВМ}} (i_{\text{я}})^2 - \epsilon_{\text{с}}, \quad (2)$$

где $L_{\text{я1}}(i_{\text{я1}}) = L_{\text{я2}}(i_{\text{я2}})$ – индуктивности рассеяния якорных обмоток двигателей М1 и М2; $L_{\text{ВМ}}(i_{\text{я}})$ – индуктивность обмотки возбуждения двигателя; $L_{\text{Г}}$ – индуктивность двух фаз со стороны переменного тока; $R_{\text{я1}} = R_{\text{я2}}$ – активные сопротивления якорных обмоток двигателей; $R_{\text{ВМ}}$ – активное сопротивление обмотки возбуждения; $R_{\text{Г}}$ – активное сопротивление двух фаз со стороны переменного тока $L_{\text{оя}}(i_{\text{я}}) = L_{\text{я}}(i_{\text{я}}) + L_{\text{Г}}(i_{\text{я}})$;

$$\epsilon_{\text{с}} = \frac{M_{\text{с}}}{I_{\text{пр}}}, \quad (3)$$

где $M_{\text{с}}$ и $J_{\text{пр}}$ – соответственно момент сопротивления движению и момент инерции, приведенные к валу двигателя.

Индуктивность рассеяния якорной цепи двигателя может быть вычислена по приближенной формуле Уманского-Линвилля:

$$L_{\text{я}} = \gamma \frac{U_{\text{н}}}{p\omega_{\text{н}} I_{\text{М}}}. \quad (4)$$

Здесь $\gamma = 0,6$ для некомпенсированных и $\gamma = 0,25$ для компенсированных двигателей; $\omega_{\text{н}}$ – угловая скорость двигателя, с^{-1} [4].

Так как индуктивность рассеяния якорной цепи $L_{\text{я}}$ значительно меньше индуктивности обмотки возбуждения, связанной с главным потоком двигателя, то в ряде случаев ею пренебрегают. Однако такое допущение может внести принципиальное искажение в характер процессов, так как при $L_{\text{я}} = 0$ ток двигателя при скачкообразных изменениях приложенного напряжения приобретает возможность также изменяться скачкообразно.

При этом выражение $k\omega L_{\text{ВМ}}(i_{\text{я}})i_{\text{я}}$ представляет собой ЭДС двигателя, которое, как известно, определяется соотношением

$$e = k\omega L_{\text{ВМ}}(i_{\text{я}})i_{\text{я}} = k\Phi\omega, \quad (5)$$

где $k = pN/2\pi a$ – конструктивный коэффициент двигателя; N – число активных проводников якоря; a – число параллельных ветвей обмотки якоря.

Полученная система дифференциальных уравнений существенно нелинейна не только в связи с наличием члена “ i^2 ”, но и нелинейной зависимости индуктивности якорной цепи, обусловленной обмотками якоря и возбуждения $L_{\text{ВМ}}$, магнитного потока ($i_{\text{я}}$) и момента двигателя от тока якоря.

При замыкании ключа К (рис.1), представляющего собой три параллельно включенных тиристора VS3...VS5, в якорной цепи образуются два контура с токами якоря $i_{\text{я}}$ и возбуждения $i_{\text{ВМ}}$. Записав уравнения по методу контурных токов, путем несложных преобразований окончательно получим

$$L_{\text{оя}}(i_{\text{я}}) \frac{di_{\text{я}}}{dt} = U_{\text{д}} - R_{\text{оя}} - k\omega L_{\text{ВМ}}(i_{\text{я}})i_{\text{ВМ}}, \quad (6)$$

$$L_{\text{ВМ}}(i_{\text{я}}) \frac{di_{\text{ВМ}}}{dt} = -R_{\text{ВМ}}i_{\text{ВМ}} + \Delta U_{\text{Т}}, \quad (7)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = 2 \frac{k}{I} L_{\text{ВМ}}(i_{\text{я}})i_{\text{я}} - \varepsilon_{\text{с}}, \quad (8)$$

где $\Delta U_{\text{Т}}$ – падение напряжения в проводящем направлении, $\Delta U_{\text{Т}}=1,5...2B$.

Таким образом, в режиме ослабления поля якорная цепь описывается уравнениями (1), (2) при разомкнутом ключе. При включении ключа К якорная цепь описывается уравнениями (6)-(8). При переходе ключа из одного состояния в другое системы дифференциальных уравнений (1), (2) и (6)-(8) “сшиваются”. Очевидно, что если в интервале времени (t_1 , t_2) ключ К разомкнут, то состояние якорной цепи определяется из (1), (4). В момент коммутации ключа t_2 якорная цепь будет описываться уравнениями (6)-(8). Но начальные условия определяются из решения уравнений (1), (2) в момент времени t_2 . Аналогично происходит “сшивка” решений при переходе ключа из замкнутого состояния в разомкнутое. На рис.2 хорошо прослеживается колебательный характер процесса изменения якорного тока $i_{\text{я}}(t)$. Такое изменение тока $i_{\text{я}}(t)$ объясняется нелинейностью магнитной системы двигателя, когда его параметры являются функцией координат состояния. При этом изменение якорного тока вызывает изменение индуктивности якорной цепи, обусловленное обмотками якоря и возбуждения, а следовательно, и изменение собственной частоты и степени демпфирования системы. На рис.3 показана осциллограмма изменения угловой скорости тягового электродвигателя (ТЭД), характеризующая пуск порожнего автосамосвала на бетонном участке дороги с ограничением скорости движения до 38,4 км/ч или 10,69 м/с. Как видно из рис.2 и 3, при изменении якорного тока и угловой скорости ТЭД наблюдается приемлемая сходимость экспериментальной и полученной на модели осциллограмм токов и скорости движения.

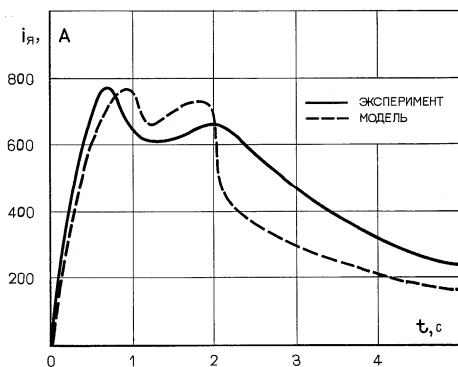


Рис.2

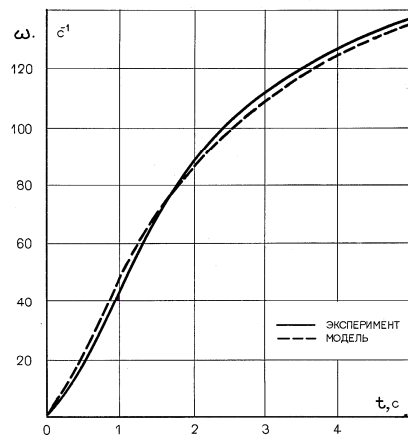


Рис.3

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Погарский Н.А., Степанов А.Д.** Универсальные трансмиссии пневмоколесных машин повышенной единичной мощности. –М.: Машиностроение, 1976.–234с.
2. Математическое моделирование: Процессы в нелинейных средах / Под ред. **А.А. Самарского**.–М.:Наука, 1986. – 310с.
3. **Иoffee А.Б.** Тяговые электрические машины. –М.–Л.: Энергия, 1965. –232с.
4. **Чиликин М.Г., Ключев В.И., Сандлер А.С.** Теория автоматизированного электропривода: Учеб. пособие для вузов. –М.: Энергия, 1979.– 616с.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 12.03.2003.

Է.Ա. ՀԱԿՈԲՅԱՆ, Վ.Ս. ՀՈՎՍԵՓՅԱՆ

ՓՈՓՈԽԱԿԱՆ - ՀԱՍՏԱՏՈՒՆ ՀՈՍԱՆՔԻ ՔԱՐՇԱՅԻՆ ԷԼԵԿՏՐԱԶԱՂՈՐԴԱԿԻ ՄԱԹԵՄԱՏԻԿԱԿԱՆ ՄՈԴԵԼԸ ՇԱՐԺԻԶԱՅԻՆ ՌԵՃԻՄՈՒՄ

Տրված է քարշային էլեկտրաբանեցման մաթեմատիկական նկարագրությունը: Ցույց է տրված դիֆերենցիալ հավասարումների համակարգի շոշափելի ապագծայնությունը՝ պայմանավորված մագնիսական հոսքի, խարսխի և գրգռման փաթույթներով:

E.A. HAKOBYAN, V.S. HOVSEPYAN
A MATHEMATICAL MODEL OF ALTERNATING-DIRECT CURRENT
ELECTRIC TRACTION DRIVE IN MOTION

A mathematical model of a.c and d.c. electric traction drive system is described. The differential equation system obtained is nonlinear conditioned by armature and excitation windings.

Г. К. ЕГОЯН, К.Г. АВETИСЯН

НОВЫЕ ТРЕБОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ

Рассмотрены новые требования по электромагнитной совместимости (ЭМС) технических средств народнохозяйственного применения, а также вопросы гармонизации стандартов по ЭМС с директивами ЕС. Выявлена важность разработки и принятия технического регламента, касающегося технического регулирования в области ЭМС на территории Армении.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, гармонизация стандартов, технический регламент, директивы ЕС, сертификация.

За последние шесть-восемь лет в сфере обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) технических средств (ТС), таких как электротехнические, электронные и радиоэлектронные изделия (компоненты, аппараты, системы или установки), а также любые изделия, содержащие электрические и/или электронные компоненты народнохозяйственного применения, произошли существенные изменения. В принятых в этот период международных стандартах Международной Электротехнической Комиссией (МЭК) были установлены требования ЭМС, которые ранее для указанных ТС не применялись. Эти новые требования направлены на обеспечение устойчивости ("иммунитета") ТС различных видов и назначений к воздействию электромагнитных помех в условиях эксплуатации и на ограничение создания ("эмиссии") низкочастотных электромагнитных помех, ухудшающих качество электрической энергии в электрических сетях, к которым подключены ТС, и способных нарушить нормальное функционирование других ТС, подключенных к указанным электрическим сетям.

Одновременно в развитых странах было введено обязательное подтверждение соответствия требованиям ЭМС при допуске ТС для реализации на рынке и осуществления надзорно-контрольных функций со стороны государственных органов. В результате ТС, не отвечающие новым требованиям ЭМС, в настоящее время не могут являться предметом экспорта в страны-члены ЕС и многие другие зарубежные страны.

Ужесточение требований в сфере обеспечения ЭМС технических средств народнохозяйственного применения, по существу, аналогично установлению на международном уровне других, новых требований к продукции, например, введению Международным комитетом по гражданской авиации (ИКАО) более жестких требований, касающихся шумов двигателей гражданской авиации или введению ИСО повышенных требований по обеспечению безопасности автотранспортных средств и т.д. В случаях, когда установленным в международных стандартах подобным требованиям не уделялось должного внимания отечественных специалистов и руководящего состава предприятий промышленности, были неизбежными значительные экономические потери.

Как же изменился состав требований ЭМС, применяемых для современных ТС? До 1990-1995 гг. мероприятия по обеспечению ЭМС ТС народнохозяйственного применения осуществлялись с единственной целью - защиты радиоприема от радиопомех, создаваемых техническими средствами. Старые требования международных стандартов ЭМС, которым должны были соответствовать ТС, заключались в ограничении промышленных радиопомех, причем для промышленного оборудования многих видов уровни промышленных радиопомех не устанавливались. Кроме того, для радиопередающих устройств дополнительно вводились ограничения нежелательных радиоизлучений (внеполосных, побочных и за счет нестабильности частоты), а для бытовой радиоэлектронной аппаратуры - требования помехоустойчивости при воздействии радиочастотного электромагнитного поля и наведенных радиопомех. Состав требований, установленных в международных стандартах ЭМС, действовавших до 1990-1995 гг., и номенклатура ТС, для которых они применялись, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Цель осуществления мероприятий ЭМС	Требования по обеспечению ЭМС	ТС, предназначенные для применения	
		в жилых, коммерческих зонах и производственных зонах с малым энергопотреблением	в промышленных зонах
Защита радиоприема от радиопомех, создаваемых ТС	Ограничение кондуктивных и излучаемых промышленных радиопомех	+	+ (для высокочастотных установок и оборудования информационных технологий)
	Ограничение нежелательных радиоизлучений	+(для радиопередающих устройств)	—
	Устойчивость к радиочастотному электромагнитному полю и наведенным радиопомехам	+(для бытовой радиоэлектронной аппаратуры)	—

Примечание.

+ требования применяются;

— требования не применяются.

В принятых в 1994-1999 гг. международных стандартах МЭК и СИСПР было установлено, что ТС народнохозяйственного применения любых видов и назначений должны не только отвечать старым требованиям ЭМС, направленным на защиту радиоприема от радиопомех, но и обеспечивать нормальную и безопасную работу ТС в условиях эксплуатации, а также качество электрической энергии в электрических сетях, удовлетворяя целой гамме новых требований ЭМС, относящихся к

ограничению помехоэмиссии и обеспечению помехоустойчивости. Состав требований, установленных в действующих в настоящее время общих международных стандартах ЭМС, и номенклатура ТС, для которых указанные требования применяются, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Цель осуществления мероприятий ЭМС	Требования по обеспечению ЭМС	ТС, предназначенные для применения	
		в жилых, коммерческих зонах и производственных зонах с малым энергопотреблением	в промышленных зонах
1	2	3	4
Помехоэмиссия			
Защита радиоприема от радиопомех, создаваемых ТС	Ограничение кондуктивных и излучаемых промышленных радиопомех	+	+
	Ограничение нежелательных радиоизлучений	+ (для радио-передающих устройств)	—
Обеспечение качества электрической энергии в электрических сетях	Ограничение гармонических составляющих тока, потребляемого из электрической сети	+	—
	Ограничение колебаний напряжения электропитания и фликера, вызываемых ТС	+	—
Помехоустойчивость			
Обеспечение нормальной работы ТС при воздействии электромагнитных помех в условиях эксплуатации	Устойчивость к электростатическим разрядам	+	+
	Устойчивость к радиочастотному электромагнитному полю	+	+
	Устойчивость к кондуктивным импульсным помехам наносекундной длительности	+	+
	Устойчивость к кондуктивным импульсным помехам микросекундной длительности большой энергии	+	+
	Устойчивость к наведенным радиопомехам	+	+
	Устойчивость к динамическим изменениям напряжения электропитания	+	+
	Устойчивость к магнитному полю промышленной частоты	+	+

Уровни новых требований ЭМС, относящихся к устойчивости к внешним электромагнитным помехам, таковы, что любое ТС, предназначенное для применения в жилых, коммерческих зонах и производственных зонах с малым энергопотреблением, а также для подключения к распределительным электрическим сетям общего назначения, должно нормально функционировать при воздействии:

- электростатических разрядов напряжением 4...8 кВ;
- радиочастотного электромагнитного поля, перестраиваемого в полосе частот 80...2000 МГц, напряженностью 3 В/м;
- импульсных сетевых помех нано- и микросекундной длительности, вызванных коммутационными процессами в электрических сетях и молниевыми разрядами, напряжением 2 кВ;
- наведенных радиопомех, перестраиваемых в полосе частот 0,15...80 МГц, напряжением 3 В;
- прерываний напряжения электропитания длительностью 5 периодов (100 мс) и провалов напряжения, составляющих 30% от номинального напряжения электропитания, длительностью 25 периодов (0,5 с);
- магнитного поля частотой 50 Гц напряженностью 1 А/м.

Для технических средств, предназначенных для применения в промышленных зонах и подключения к промышленным электрическим сетям, международными стандартами ЭМС установлены более жесткие требования устойчивости к электромагнитным помехам соответствующих видов. В части помехоэмиссии новые требования ЭМС предусматривают ограничение гармонических составляющих тока, потребляемого из распределительной электрической сети общего назначения (до 40-го порядка), а также ограничение колебаний напряжения электропитания, вызванных неравномерным потреблением тока ТС, до уровня, при котором возникающий фликер (изменения светимости световых приборов) не представляет опасности для пользователя.

Пользователи ТС, в том числе физические и юридические лица, имеют право на то, чтобы применяемые ими изделия нормально функционировали в соответствии с назначением при воздействии электромагнитных помех в условиях эксплуатации. Установление для ТС народнохозяйственного применения указанных выше новых требований ЭМС реально уменьшает возможность нарушений их функционирования при воздействии электромагнитных помех в условиях эксплуатации (включая такие нарушения, как снижение эффективности функционирования, отказы в выполнении установленных функций и выполнение неуставленных функций), позволяет снизить опасность указанных нарушений для жизни, здоровья граждан, имущества физических и юридических лиц и природной среды, а также уменьшает электромагнитное загрязнение среды обитания. Поэтому введение новых требований ЭМС представляет собой способ обеспечения прав пользователей ТС, и в этом отношении обоснованность их введения и обязательного подтверждения соответствия ТС этим требованиям не вызывает сомнений.

Необходимо обратить внимание и на своевременность предпринимаемых международным сообществом мер по повышению эффективности технического регулирования в области ЭМС с тем, чтобы обеспечить нормальное

функционирование в окружающей электромагнитной обстановке не только различных радиоприемных устройств, что имело место до 1990-1995 гг., но и ТС других видов и назначений. Эти меры вызваны широким распространением в бытовой, производственной и хозяйственной сферах различных технических средств, основанных на использовании микроэлектроники и компьютерной техники, обладающих повышенной электромагнитной восприимчивостью, а также непрерывным возрастанием уровней внешних электромагнитных помех, включая кондуктивные низко- и высокочастотные помехи в электрических сетях и излучаемые высокочастотные помехи, вызываемые, прежде всего, мобильными радиотелефонами.

При этом возникает вопрос: насколько оправданным (с экономической точки зрения) является установление новых требований помехоустойчивости для всех ТС народнохозяйственного применения (без учета их назначений, видов и степени возможной опасности нарушения их функционирования при воздействии электромагнитных помех), а также требований помехоэмиссии для всех без исключения ТС, подключаемых к распределительным электрическим сетям общего назначения?

Для выполнения требований по ограничению помехоэмиссии и обеспечению помехоустойчивости ТС, установленных в действующих в настоящее время международных стандартах ЭМС, конструктор вынужден будет применять как на уровне печатной платы, так и на уровне конструкции гораздо более сложный и дорогостоящий комплекс защитных мер, чем это имело место до 1990-1995 гг., причем с таким расчетом, чтобы разработанное и серийно производимое изделие не только нормально функционировало в условиях эксплуатации, но могло, с учетом производственных допусков, пройти процедуру подтверждения соответствия новым требованиям ЭМС. Потребуется также значительно более сложный и дорогостоящий комплекс испытаний. Номенклатура защитных мер должна соответствовать и старым, и новым требованиям ЭМС и может включать экранирование, применение помехоподавляющих фильтров, управление потребляемым током, применение устройств ограничения импульсных помех, помехоустойчивое конструирование печатных плат, организацию параллельной работы схем, обеспечение симметрии относительно земли, заземление и выравнивание электрических потенциалов устройств, эффективную прокладку проводов. Соответствие состава требований ЭМС номенклатуре защитных мер при конструировании ТС проиллюстрировано в табл. 3.

Расширение и ужесточение требований ЭМС повышает издержки при разработке и производстве ТС, особенно тех, которые не только должны отвечать новым требованиям ЭМС, но и быть конкурентоспособными по отношению к изделиям других фирм. Поэтому, исходя из соображений экономики, можно было ожидать, что новые требования помехоустойчивости будут установлены в международных стандартах не для всех ТС, а только для тех, нарушение работы которых при воздействии электромагнитных помех непосредственно связано с опасностью для жизни людей и возможностью нанесения вреда их здоровью, имуществу и окружающей природной среде. В равной степени можно было ожидать, что ограничение низкочастотной помехоэмиссии также должно было быть

установлено не для всех ТС, подключаемых к распределительным электрическим сетям общего назначения, а только для являющихся существенными источниками ухудшения качества электрической энергии.

Таблица 3

Требования по обеспечению ЭМС	Защитные меры при конструировании
Старые требования	
Ограничение кондуктивных и излучаемых промышленных радиопомех. Экранирование	Применение помехоподавляющих фильтров
Новые требования	
- Ограничение гармонических составляющих тока, потребляемого из электрической сети - Ограничение колебаний напряжения электропитания и фликера, вызываемых ТС - Устойчивость к электростатическим разрядам - Устойчивость к радиочастотному электромагнитному полю - Устойчивость к кондуктивным импульсным помехам наносекундной длительности - Устойчивость к кондуктивным импульсным помехам микросекундной длительности большой энергии - Устойчивость к наведенным радиопомехам - Устойчивость к динамическим изменениям напряжения электропитания - Устойчивость к магнитному полю промышленной частоты	- Управление потребляемым током - Экранирование - Применение помехоподавляющих фильтров - Применение устройств ограничения импульсных помех - Помехоустойчивое конструирование печатных плат - Организация параллельной работы схем - Обеспечение симметрии относительно земли - Заземление и выравнивание электрических потенциалов устройств - Эффективная прокладка проводов

Однако МЭК при разработке стандартов, устанавливающих новые требования ЭМС, не руководствовалась соображениями экономики, а пошла по другому пути: указанные требования ЭМС были установлены в международных стандартах для ТС практически всех видов и назначений [1]. Это обстоятельство связано с позицией наиболее крупных предприятий и фирм, разрабатывающих и производящих электротехнические, электронные и радиоэлектронные изделия, а также фирм - производителей средств испытаний в области ЭМС, представители которых весьма активно работают в технических комитетах МЭК. Введение новых требований ЭМС для ТС всех видов и назначений не только не встретило возражений со стороны указанных предприятий и фирм, но и получило их активную поддержку, так как оно рассматривается, с полным на то основанием, как способ повышения конкурентоспособности продукции и как эффективная форма конкурентной борьбы

на мировых рынках. Установление в новых международных и национальных стандартах более жестких требований ЭМС, относящихся к ограничению помехоэмиссии и обеспечению помехоустойчивости в реальных условиях электромагнитной обстановки, усложняет разработку продукции, но приводит к повышению ее технических и эксплуатационных характеристик, а введение обязательного подтверждения соответствия новым требованиям ЭМС может в значительной степени затруднить проникновение на рынки продукции конкурирующих фирм. Таким образом, наиболее крупные фирмы и предприятия, достигшие передового уровня в разработке и производстве ТС различных видов и назначений, пришли к согласию о защите своей продукции от конкуренции путем установления в международных стандартах новых, более жестких требований ЭМС. Следует отметить, что использование технологий, относящихся к обеспечению электромагнитной совместимости ТС, является весьма удобным при решении задач конкурентной борьбы, так как указанные технологии, как правило, не связаны с функциональным назначением ТС, наукоемки, требуют много затрат и в настоящее время находятся в состоянии развития [2].

То обстоятельство, что новые требования ЭМС выполняют не только функцию защиты прав пользователей, но и функцию экономической борьбы в мировой конкурентной среде, не должно рассматриваться как недостаток современных международных стандартов или новых требований ЭМС. Более того, указанная двойственность функций новых требований ЭМС, а равно и других новых требований к продукции, устанавливаемых в современных международных стандартах, стала в настоящее время неременным условием экономической деятельности развитых стран и международных монополий.

Отметим, что необходимо принять меры по введению в действие государственных стандартов, устанавливающих новые требования ЭМС и методы испытаний, гармонизированных с международными, содержащих современные требования к ТС народнохозяйственного применения по ограничению помехоэмиссии и обеспечению устойчивости к внешним электромагнитным помехам (прежде всего серий ГОСТ Р 51317 и ГОСТ Р 51318, соответствующих стандартам МЭК серии 61000-4 и СИСПР) [3].

Вместе с тем существенным недостатком продолжает оставаться полное отсутствие в законодательстве Республики Армения правовых норм, относящихся к регулированию в области ЭМС. Важным для устойчивого развития страны будет разработка правовых норм, по аналогии со странами-членами ЕС и другими развитыми зарубежными странами, для осуществления обязательного подтверждения соответствия современным требованиям ЭМС ТС многих классов, подклассов и групп, включая продукцию машиностроения (прежде всего станочное оборудование), средства автоматизации общепромышленного назначения, приборы и оборудование для научных исследований и т.д.

Поэтому важнейшее значение в настоящее время имеет разработка и принятие технического регламента, касающегося технического регулирования в области ЭМС. О необходимости его разработки свидетельствует указ Правительства РА N 9 "Об

утверждении порядка разработки, принятия и применения технического регламента” от 11.01.2000г.

Для осуществления эффективного технического регулирования в области ЭМС необходим именно технический регламент, аналогичный по содержанию Директиве 89/336/ЕЭС "О согласовании законодательных актов государств-участников Сообщества, касающихся электромагнитной совместимости", обеспечивающий правовые основы так называемого "горизонтального" регулирования, а не технические регламенты по видам продукции, включающие соответствующие требования, так как в последнем случае требования и способы подтверждения соответствия в области ЭМС невозможно будет установить для технических средств всех видов и назначений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Сорокин Е.** Гармонизация требований к межгосударственным и российским стандартам // Стандарты и качество. - 2003. - N1.-С.22-23
2. **Кармашев В.С.** О некоторых проблемах обеспечения электромагнитной совместимости технических средств в условиях присоединения Российской Федерации к Всемирной торговой организации // Стандарты и качество. - 2002. - № 6. - С. 23-27
3. Серии стандартов ГОСТ Р 51317 и ГОСТ Р 51318.

ЗАО "РЕДИКОМ". Материал поступил в редакцию 10.11.2003.

Գ. Կ. ԵՂՈՅԱՆ, Կ.Հ. ԱՎԵՏԻՍՅԱՆ

ԷԼԵԿՏՐԱՄԱԳՆԻՍՏԱԿԱՆ ՀԱՄԱՏԵՂԵԼԻՈՒԹՅԱՆ ՆՈՐ ՊԱՀԱՆՋՆԵՐ

Դիտարկված են լայն օգտագործման տեխնիկական միջոցների էլեկտրամագնիսական համատեղելիության (ԷՄՀ) ապահովման բնագավառում պահանջների խստացումը և ԷՄՀ ստանդարտների ներդաշնակեցումը ԵԽ-ի հրահանգներին: Բացահայտված է ՀՀ տարածքում ԷՄՀ բնագավառի տեխնիկական կարգավորմանը վերաբերող տեխնիկական կանոնակարգերի մշակման և ընդունման կարևորությունը:

G. K. EGHOYAN, K.H. AVETISYAN

NEW REQUERMENTS OF ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY

New electromagnetic compatibility (EMC) requirements for consumer technical means, as well as harmonization of EMC standards with EC directives issue are viewed. Importance of the development and acceptance of EMC technical regulations in Armenia are revealed.

ԲՈՎԱՆԴԱԿՈՒԹՅՈՒՆ

ՄԱՐԳՍՅԱՆ ՅՈՒ.Լ., ՍՏԵՓԱՆՅԱՆ Կ.Գ., ԱԶՈՒԶ Ն.,

ԳԵՎՈՐԳՅԱՆ Հ.Ա.

ԱՌԱՋԳԱԿԱՆ ՄԱՆԻՊՈՒԼՅԱՏՈՐՆԵՐԻ ԴԻՆԱՄԻԿԱԿԱՆ ՎԵՐԼՈՒԾՈՒԹՅՈՒՆԸ ՆՅՈՒՏՈՆ - ԷՅԼԵՐԻ ԸՆԴՀԱՆՐԱՅՎԱԾ ՄԵԹՈԴՈՎ **3**

ՀԱՐՈՒԹՅՈՒՆՅԱՆ Հ.Հ.

ՌԱՆԴՄԱՆ ԳՈՐԾԸՆԹԱՅՈՒՄ ՀԱՐՎԱԾԻ ԵՎ ԿՏՐՄԱՆ ՈՒԺԵՐԻ ՈՒՍՈՒՄՆԱՍԻՐՈՒԹՅՈՒՆԸ ՆԱԽԱՊԱՏՐԱՍՏՎԱԾՔԻ ՄԵՋ ԿՏՐԻՉԻ ՆԵՐԽՐՄԱՆ ԵՐԿԱՅՆՈՒԹՅԱՄԲ **11**

ՄԱՐԳՍՅԱՆ Մ.Գ.

ԱԼՄԱՍՏԱՅԻՆ ԱՇԽԱՏԱՆՔԱՅԻՆ ՕՐԳԱՆՈՎ ԱՊԱՐՆԵՐԻ ՔԱՅՔԱՅՄԱՆ ԴԻՄԱԴՐՈՒԹՅԱՆ ՈՐՈՇՈՒՄԸ **16**

ԱՅՎԱԶՅԱՆ Ռ.Ս.

ՀԱՄԱԿՅՎԱԾ ՆԵՐՄՂՄԱՆ ԿԻՐԱՌՄԱՆ ՀՆԱՐԱՎՈՐՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԸ ԱՎՏՈՏՐԱԿՏՈՐԱՅԻՆ ԴԻՋԵԼՆԵՐՈՒՄ **21**

ԲԵԼԼՈՒՅԱՆ Զ.Ա.

ՄԻՆԽՐՈՆ ԳԵՆԵՐԱՏՈՐՆԵՐԻ ԱՌԱՅՔԱԿԱԼԱՅԻՆ ՀԱՆԳՈՒՅՑԻ ՀՈՒՍԱԼԻՈՒԹՅԱՆ ՀԱՇՎԱՐԿԻ ՄԵԹՈԴԻԿԱՆ **25**

ԱՂԲԱԼՅԱՆ Ս.Գ., ԶԱՔԱՐՅԱՆ Ֆ.Հ., ՀՈՎՀԱՆՆԻՍՅԱՆ Ա.Ս.

ՖԵՐՈՍՈԼԻԲԴԵՆԻ ՍՏԱՅՄԱՆ ՏԵԽՆՈԼՈԳԻԱԿԱՆ ԱՌԱՆՁԱՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԸ ԵՎ ՔԱԶԱՐԱՆԻ ՀԱՐՍՏԱՅՈՒՑԻՉ ՖԱԲՐԻԿԱՅԻ ՄՈԼԻԲԴԵՆԻՏԱՅԻՆ ԽՏԱՆՅՈՒԹԵՐԻՑ ՈՒ ԹԱՓՈՆՆԵՐԻՑ ՆՐԱ ՍՏԱՅՄԱՆ ՏԵԽՆՈԼՈԳԻԱՅԻ ՄՇԱԿՈՒՄԸ **31**

ՊՈՂՈՍՅԱՆ Ա.Կ., ՄԱՐՈՅԱՆ Վ.Վ., ՄԱՐՏԻՐՈՍՅԱՆ Տ.Ռ.

ԱՐՏԱԴՐԱԿԱՆ ԹԱՓՈՆՆԵՐԻ ՀԻՄՔՈՎ ՆՈՐ ՔՍՈՒՔՆԵՐԻ ՇՓԱԳԻՏԱԿԱՆ ՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄ **44**

ՄԱՍՅԱՆ Ս.Գ., ԱՆԴՐԻԱՍՅԱՆ Ա.Վ.

ԶՐԱԾՆԱՅԻՆ ԲԵԿՈՒՆՈՒԹՅԱՆ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԸ ՓՈՇԵՊՈՂՊԱՏՆԵՐՈՒՄ ԲԱՐՁՐ ԶԵՐՄԱՄԵԽԱՆԻԿԱԿԱՆ ՄՇԱԿՄԱՆ (ԲԶՄՄ) ԺԱՄԱՆԱԿ **45**

ՄԱՐՏԻՐՈՍՅԱՆ Վ.Հ., ՇՄԱՎՈՆՅԱՆ Ա.ՅՄ., ԱՌԱՔԵԼՈՎԱ Է.Ռ.

ԱՆՎԱՌԱՐԱՆ ԱԼՅՈՒՄԻՆԱԶԵՐՄԱՅԻՆ ՎԵՐԱԿԱՆԳՆՄԱՆ ԵՂԱՆԱԿՈՎ ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ՔՐՈՄԻՏԱՅԻՆ ՀԱՆՔԱՆՅՈՒԹԵՐԻՑ ՖԵՐՈՔՐՈՄԻ ՍՏԱՅՄԱՆ ԳՈՐԾԸՆԹԱՅԻ ՈՒՍՈՒՄՆԱՍԻՐՈՒԹՅՈՒՆԸ **53**

ԿԱՐԱՊԵՏՅԱՆ Ա.Ն.

ՀԵՏԵՐՈՑԻԿԼԱՅԻՆ ՊՈԼԻՄԵՐՆԵՐԻ ՀԻՄՔՈՎ ԻՆՔՆԱՅՈՒՂՎՈՂ ԿՈՄՊՈԶԻՏՆԵՐԻ ՇՓԱԳԻՏԱԿԱՆ ՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄ .. **58**

ԱՖՐԻԿՅԱՆ Տ.Հ.

ԿՈՂՄՆՈՐՈՇՎԱԾ ԵՎ ՔԱՈՍԱՅԻՆ ԴԱՄԱՎՈՐՈՒԹՅԱՄԲ ԱԼՄԱՍՏԵ ՀԱՏԻԿՆԵՐՈՎ ՀՂԿԱՔԱՐԵՐԻ ԱՇԽԱՏՈՒՆԱԿՈՒԹՅԱՆ ԳՆԱՀԱՏՈՒՄԸ **63**

ՄԱՐՈՒԹՅԱՆ Ռ.Զ., ԹԱԹԻԿՅԱՆ Տ.Ս.

ՀՀ ԷՆԵՐԳԱՀԱՄԱԿԱՐԳԻ ԷԼԵԿՏՐԱԿԱՅԱՆՆԵՐԻ ՄԻՋԵՎ ԷԼԵԿՏՐԱԿԱՆ ԲԵՈՒ ԲԱՇԽՄԱՆ ԼԱՎԱՐԿՈՒՄԸ **69**

ԽԱՉԱՏՐՅԱՆ Վ.Ս., ԽԱՉԱՏՐՅԱՆ Կ.Վ.

ԷԷՀ-Ի Y-Z ԴԻԱԿՈՊՏԻԿԱԿԱՆ ՄԱՏՐԻՑԻ ՃՇԳՐՏՈՒՄԸ P-U ՏԵՍՔԻ ԿԱՅԱՆԱՅԻՆ ՀԱՆԳՈՒՅՑՆԵՐԸ ԲԵՌՆԱՅԻՆ ՀԱՆԳՈՒՅՑՆԵՐՈՎ ՓՈԽԱՐԻՆԵԼՈՒ ԴԵՊՔՈՒՄ **77**

ՄՆԱՅԱԿԱՆՅԱՆ Մ.Ա.

ԷԼԵԿՏՐԱԷՆԵՐԳԵՏԻԿԱԿԱՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳԻ ԹՈՒՅԼԱՏՐԵԼԻ ԿԱՅՈՒ- ՆԱՅՎԱԾ ՌԵԺԻՄԻ ՀԱՇՎԱՐԿԸ ԴԻԱԿՈՊՏԻԿԱԿԱՆ ՄԵԹՈԴՈՎ	83
ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ Վ.Գ. ՋՋԷՌ-440 ՏԻՊԻ ԱԷԿ-ԵՐԻ ՎԵՐԱՀՄԿՄԱՆ ԵՎ ԱԽՏՈՐՈՇՄԱՆ ԻՆՏԵԳՐԱԼ ՀԱՄԱԿԱՐԳԻ ԱԼԳՈՐԻթՄԵՐԻ ՀԱՄԱԽՈՒՄԲ	94
ՄԱԼԱՔՅԱՆ Յ.Ա. ՋՐԻ ՋԵՐՄԱՍՏԻՃԱՆԻ ՈՐՈՇՈՒՄԸ ՀԱՅԿԱԿԱՆ ԱԷԿ-Ի ԲԱՐՁՐ ՃՆՇՄԱՆ ՎԹԱՐԱՅԻՆ ՀՈՎԱՑՄԱՆ ԵՆԹԱՀԱՄԱԿԱՐԳԻ ԽՈՂՈՎԱԿԱՇԱՐՈՒՄ ՇՐՋԱԿԱ ՄԻՋԱՎԱՅՐԻ ՑԱԾՐ ՋԵՐՄԱՍՏԻՃԱՆՆԵՐԻ ՊԱՅՄԱՆՆԵՐՈՒՄ ..	100
ՄԱՆԿՈՒԼՈՎ Ա.Ա., ԲԱՂՂԱՍԱՐՅԱՆ Հ.Վ., ԿՆՅԱՋՅԱՆ Թ.Մ. ՄԱՀՄԱՆԱՓԱԿ ՄԻՋԱՎԱՅՐԵՐՈՒՄ ՀԱՐԹ ԷԼԵԿՏՐԱՄԱԳՆԻՍԱԿԱՆ ԱԼԻՔԻ ԱՄՊԼԻՏՈՒԴԻ ՎԱՐՔԻ ՈՐԱԿԱԿԱՆ ՎԵՐԼՈՒԾՈՒԹՅՈՒՆԸ .	107
ԿԱՐԱԽԱՆՅԱՆ Լ.Հ. ԱՌԱՆՅՔԱՀԱՄԱՉԱՓ ԴԱՇՏԻ ԼԱՐՎԱԾՈՒԹՅԱՆ ՀԱՎԱՍԱՐԵՑՄԱՆ ՄԵԹՈԴ .	115
ԱՎԵՏԻՍՅԱՆ Ա.Գ., ՄԻՄՈՆՅԱՆ Ս.Հ., ԲԱՂԱԼՅԱՆ Գ.Ա. ՖԱԴԴԵԵՎԻ ՄԵԹՈԴԻ ՆՄԱՆԱԿԵՐՊԸ ՈՉ ԱՎՏՈՆՈՄ ՄԱՏՐԻՑՆԵՐԻ ՀԱՄԱՐ	121
ՄԵԼԻՔՅԱՆ Վ.Շ., ՄԿՐՏՅԱՆ Է.Է., ՄԿՐՏՅԱՆ Կ.Գ., ՀՈՎՀԱՆՆԻՍՅԱՆ Ղ.Ղ., ՍՈՂՈՍՈՆՅԱՆ Վ.Ս. ԷԼԵԿՏՐՈՆԱՅԻՆ ՄԽԵՄԱՆԵՐԻ ՏԱՐԱՆՋԱՏՄԱՆ ՄԵԹՈԴ	130
ԳՐԻԳՈՐՅԱՆ Յ.Պ. ՑԱՆԿԱԼԻ ՍՊԵԿՏՐՈՎ ԿԱՌԱՎԱՐՄԱՆ ՄԻՆԹԵԶ ԱԿՀ - ՈՒՄ՝ ԿԱՐԳԱՎՈՐՉԻ ՄՈՒՏՔԵՐԻ ԹՎԻ $m > 1$ ԱՐԺԵՔԻ ԴԵՊՔՈՒՄ	138
ԳՐԻԳՈՐՅԱՆ Տ.Ա. ԻՆՏԵՐՆԵՏ ԾԱՌԱՅՈՒԹՅԱՆ ԱՇԽԱՏԱՆՔԻ ԾԱՎԱԼԻ ԳՆԱՀԱՏՈՒՄԸ ՏՎՅԱԼՆԵՐԻ ՀԵՆՔԻՆ ՀԱՐՑՈՒՄՆԵՐԻ ԴԵՊՔՈՒՄ	147
ԱԶԻԶԲԵԿՅԱՆ Հ.Վ., ՀԱՐՈՒԹՅՈՒՆՅԱՆ Է.Հ., ՂԱԶԱՐՅԱՆ Ռ.Ա., ՄԱՆՈՒԿՅԱՆ Ա.Մ. ՓՈՔՐ ԹԵՔՎԱԾՔՆԵՐԻ ՉԱՓՄԱՆ ՀԱՄԱՐ ՆՈՐ ՕՊՏԻԿԱԾՄԵԽԱՆԻԿԱ- ԿԱՆ ՍԱՐՔԻ ՄԿՋՐՈՒՆՔՆԵՐԻ ՄՇԱԿՈՒՄ	154
ԽՈՒՐՈՉԵ Ռ.Ա. ՈՐՈՇ ՆՈՐ ՄՈՏԵՑՈՒՄՆԵՐ ՀՈՒՍԱԼԻՈՒԹՅԱՆ ՄԱԹԵՄԱՏԻԿԱԿԱՆ ՏԵՍՈՒԹՅԱՆ ՄԵՋ	159
ՄՏԵՓԱՆՅԱՆ Ն.Գ. ՄԵՏԱՂԱ-ԴԻԷԼԵԿՏՐԻԿԱԿԱՆ ԱԼԻՔԱՏԱՐԱՅԻՆ ԳՐԳՈՒՉԻ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄ	167
ՄԵԼԻՔՅԱՆ Ջ.Ա., ՂԱԶԱՐՅԱՆ Հ.Ս. ՍՏՈՐԳԵՆՅԱ ԳԱԶԱՀՈՐԵՐԻ ԼՅՄԱՆ ԳՈՐԾԸՆԹԱՅՈՒՄ ԳԱԶԻ ՋԵՐՄԱՖԻԶԻԿԱԿԱՆ ԵՎ ՔԱՆԱԿԱԿԱՆ ՊԱՐԱՄԵՏՐԵՐԻ ՈՐՈՇՄԱՆ ՄԵԹՈԴ	171
ՀԱԿՈԲՅԱՆ Է.Ա., ՀՈՎՄԵՓՅԱՆ Վ.Ս. ՓՈՓՈԽԱԿԱՆ - ՀԱՍՏԱՏՈՒՆ ՀՈՍԱՆՔԻ ՔԱՐՇԱՅԻՆ ԷԼԵԿՏՐԱՀԱՂՈՐ- ԴԱԿԻ ՄԱԹԵՄԱՏԻԿԱԿԱՆ ՄՈԴԵԼԸ ՇԱՐԺԻՉԱՅԻՆ ՌԵԺԻՄՈՒՄ	179
ԵՂՈՅԱՆ Գ.Կ., ԱՎԵՏԻՍՅԱՆ Կ.Հ. ԷԼԵԿՏՐԱՄԱԳՆԻՍԱԿԱՆ ՀԱՄԱՏԵՂԵԼԻՈՒԹՅԱՆ ՆՈՐ ՊԱՀԱՆՋՆԵՐ	183

СОДЕРЖАНИЕ

САРКИСЯН Ю.Л., СТЕПАНЯН К.Г., АЗУЗ Н., ГЕВОРКЯН Г.А. ДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ УПРУГИХ МАНИПУЛЯТОРОВ ОБОБЩЕННЫМ МЕТОДОМ НЬЮТОНА-ЭЙЛЕРА	3
АРУТЮНЯН Г.А. ИЗУЧЕНИЕ СИЛ УДАРА И РЕЗАНИЯ ВДОЛЬ ДЛИНЫ ВРЕЗАНИЯ РЕЗЦА В ЗАГОТОВКУ ПРИ СТРОГАНИИ	11
САРКИСЯН М. Г. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПОРОД РАЗРУШЕНИЮ АЛМАЗНЫМ РАБОЧИМ ОРГАНОМ.....	16
АЙВАЗЯН Р.С. О ВОЗМОЖНОСТЯХ ПРИМЕНЕНИЯ КОМБИНИРОВАННОГО НАДДУВА НА АВТОТРАКТОРНЫХ ДИЗЕЛЯХ	21
БЕЛЛУЯН З.А. МЕТОДИКА РАСЧЕТА НАДЕЖНОСТИ ПОДШИПНИКОВЫХ УЗЛОВ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ	25
АГБАЛЯН С.Г., ЗАКАРЯН Ф.А., ОГАНЕСЯН А.М. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ ФЕРРОМОЛИБДЕНА И РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ЕГО ПОЛУЧЕНИЯ ИЗ РУД ЖЕЛЕЗО- МОЛИБДЕНОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ АРМЕНИИ	31
ПОГОСЯН А.К., САРОЯН В.В., МАРТИРОСЯН Т.Р. ИЗУЧЕНИЕ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НОВЫХ КОНСИСТЕНТНЫХ СМАЗОК НА ОСНОВЕ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОТХОДОВ	44
МАМЯН С.Г., АНДРИАСЯН А.В. ИССЛЕДОВАНИЕ ВОДОРОДНОГО ОХРУПЧИВАНИЯ ПРИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ (ВТМО) ПОРОШКОВЫХ СТАЛЕЙ	45
МАРТИРОСЯН В.А., ШМАВОНЯН А.Ю., АРАКЕЛОВА Э.Р. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВНЕПЕЧНОГО АЛЮМИНОТЕРМИ- ЧЕСКОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ ХРОМИТОВЫХ РУД С ПОЛУЧЕНИЕМ ФЕРРОХРОМА	53
КАРАПЕТЯН А.Н. ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА САМОСМАЗЫВАЮЩИХСЯ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ГЕТЕРОЦЕПНЫХ ПОЛИМЕРОВ	58
АФРИКЯН Т. Г. ОЦЕНКА РАБОТОСПОСОБНОСТИ ШЛИФОВАЛЬНЫХ КРУГОВ С ХАОТИЧНЫМ И ОРИЕНТИРОВАННЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ АЛМАЗНЫХ ЗЕРЕН	63
МАРУХЯН В.З., ТАТИКЯН Т.С. ОПТИМИЗАЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ МЕЖДУ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯМИ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ РА	69
ХАЧАТРЯН В.С., ХАЧАТРЯН К.В. КОРРЕКЦИЯ Y-Z ДИАКОПТИЧЕСКОЙ МАТРИЦЫ ЭЭС ПРИ ПРЕВРАЩЕНИИ СТАЦИОННЫХ УЗЛОВ ТИПА P-U В НАГРУЗОЧНЫЕ УЗЛЫ	77
МНАЦАКАНЯН М.А. РАСЧЕТ ДОПУСТИМОГО УСТАНОВИВШЕГОСЯ РЕЖИМА	

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ МЕТОДОМ ДИАКОПТИКИ	83
ПЕТРОСЯН В.Г.	
КОМПЛЕКС АЛГОРИТМОВ ИНТЕГРАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА И ДИАГНОСТИКИ АЭС С ВВЭР- 440	94
МАЛАКЯН Ц.А.	
РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОДЫ ВО ВСАСЫВАЮЩЕМ ТРУБОПРОВОДЕ АВАРИЙНОГО СЕЙСМИЧЕСКОГО НАСОСА ААЭС ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ ОКРУЖАЮЩЕГО ВОЗДУХА	100
МАНКУЛОВ А.А., БАГДАСАРЯН О.В., КНЯЗЯН Т.М.	
КАЧЕСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ ПОВЕДЕНИЯ АМПЛИТУДЫ ПЛОСКОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ В ОГРАНИЧЕННЫХ СРЕДАХ	107
КАРАХАНИЯН Л.О.	
МЕТОД ВЫРАВНИВАНИЯ НАПРЯЖЕННОСТИ ОСЕСИММЕТРИЧНОГО ПОЛЯ	115
АВETИСЯН А.Г., СИМОНЯН С.О., БАДАЛЯН Г.А.	
АНАЛОГ МЕТОДА ФАДДЕЕВА ДЛЯ НЕАВТОНОМНЫХ МАТРИЦ	121
МЕЛИКЯН В.Ш., МКРТЧЯН Э.Э., МКРТЧЯН К.Г., ОГАНЕСЯН Д.Д., СОГОМОНЯН В.С.	
МЕТОД РАЗЪЕДИНЕНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ СХЕМ	130
ГРИГОРЯН Ф.П.	
СИНТЕЗ УПРАВЛЕНИЯ С ЖЕЛАЕМОМ СПЕКТРОМ В САР ПРИ КОЛИЧЕСТВЕ ВХОДОВ РЕГУЛЯТОРА $m > 1$	138
ГРИГОРЯН Т.А.	
ОБ ОЦЕНКЕ ОБЪЕМА РАБОТЫ ИНТЕРНЕТ-СЕРВИСА ПРИ ЗАПРОСАХ К БАЗЕ ДАННЫХ	147
АЗИЗБЕКЯН Г.В., АРУТЮНЯН Э.А., КАЗАРЯН Р.А., МАНУКЯН А.М.	
РАЗРАБОТКА ПРИНЦИПОВ НОВОГО ОПТИКО – МЕХАНИЧЕСКОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ МАЛЫХ НАКЛОНОВ	154
ХУРОДЗЕ Р.А.	
НЕКОТОРЫЕ НОВЫЕ ПОДХОДЫ В МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ	159
СТЕПАНИЯН Н.Г.	
ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТАЛЛО-ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВОЛНОВОДНОГО ВОЗБУДИТЕЛЯ	167
МЕЛИКЯН З.А., КАЗАРЯН А.С.	
МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ И КОЛИЧЕСТВЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ ГАЗА В ПРОЦЕССЕ НАГНЕТАНИЯ В ПОДЗЕМНОЕ ГАЗОХРАНИЛИЩЕ	171
АКОПЯН Э.А., ОВСЕПЯН В.С.	
МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПЕРЕМЕННО-ПОСТОЯННОГО ТОКА В ДВИГАТЕЛЬНОМ РЕЖИМЕ	179
ЕГОЯН Г. К., АВETИСЯН К.Г.	
НОВЫЕ ТРЕБОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ	183

CONTENTS

SARGSYAN Yu.L., STEPANYAN K.G., AZUZ N., GEVORGYAN H.A.	
DYNAMIC ANALYSIS OF FLEXIBLE MANIPULATORS USING THE GENERALIZED NEWTON-EULER METHOD	3
HAROUTYUNYAN H.H.	
THE STUDY OF IMPACT AND CUTTING FORCES ALONG THE CUTTING-IN LENGTH OF THE TOOL INTO THE STOCK IN PLANING....	11
SARKISSYAN M.G.	
ROCK RESISTANCE DETERMINATION TO DESTRUCTION BY DIAMOND OPERATING ORGAN	16
AIVAZYAN R.S.	
ON POSSIBILITIES OF COMBINED SUPERCHARGING APPLICATION ON AUTOTRACTOR DIESEL ENGINES	21
BELLUYAN Z.A.	
DESIGN PROCEDURE OF BEARING UNIT RELIABILITY IN SYNCHRONOUS GENERATORS	25
AGHBALYAN S.G., ZAKARYAN F.A., HOVHANNISSYAN A.M.	
TECHNOLOGICAL PECULIARITIES OF OBTAINING FERROMOLYBDENUM AND ELABORATION OF TECHNOLOGY FOR EXTRACTING IT FROM THE ORES OF IRON-MOLYBDENUM DEPOSITS IN ARMENIA	31
POGOSIAN A.K., SAROYAN W.V., MARTIROSYAN T.R.	
STUDY OF TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF NOVEL GREASES BASED ON INDUSTRIAL WASTES	44
MAMYAN S.G., ANDRIASYAN A.V.	
INVESTIGATION OF CRISPING IN POWDER STEELS	45
MARTIROSYAN V.H., SHMAVONYAN A.Y., ARAKELOVA E.R.	
STUDIES ON NON-FURNACE ALUMINOTHERMAL REDUCTION PROCESS OF CHROMICAL ORES GETTING FERROCHROME	53
KARAPETYAN A.N.	
TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF SELF-LUBRICATED COMPOSITES BASED ON HETEROCHAIN POLYMERS	58
AFRIKYAN T.G.	
GRINDING WHEEL SERVICEABILITY ESTIMATION WITH RANDOM ORIENTED DISTRIBUTION OF DIAMOND GRAINS	63
MARUKHYAN V.Z., TATIKYAN T.S.	
OPTIMIZATION OF ELECTRICAL LOAD DISTRIBUTION BETWEEN POWER PLANTS OF POWER SYSTEM RA	69
KHACHATRYAN V.S., KHACHATRYAN K.V.	
Y-Z DIACOPTIC MATRIX CORRECTION OF ELECTRIC POWER SYSTEMS IN TRANSFORMING STATION UNITS OF P-U TYPE INTO LOADING CENTRES	77

MNATSAKANYAN M.A. CALCULATION FOR PERMISSIBLE STEADY-STATE CONDITIONS IN ELECTRIC POWER SYSTEMS BY THE DIACOPTIC METHOD	83
PETROSYAN V.G. ALGORITHM COMPLEX OF INTEGRATED SYSTEM FOR MONITORING AND DIAGNOSTICS AT NPP WITH THE WWER-440 REACTOR	94
MALAKYAN TS. A. WATER TEMPERATURE CALCULATION IN SUCTION PIPELINE OF EMERGENCY SEISMIC PUMP AT NPP RA AT LOW TEMPERATURE OF ENVIRONMENT	100
MANKULOV A.A., BAGHDASARYAN H.V., KNYAZYAN T.M. QUALITATIVE ANALYSIS OF PLANE ELECTROMAGNETIC WAVE AMPLITUDE BEHAVIOUR IN CONFINED MEDIA	107
KARAKHANYAN L.H. METHOD OF EQUALIZING AXISYMMETRICAL FIELD INTENSITY	115
AVETISYAN A.G., SIMONYAN S.H., BADALYAN G.A. FADDEEV METHOD ANALOGUE FOR NON-AUTONOMOUS MATRIXES	121
MELIKYAN V.SH., MKRTCHYAN E.E., MKRTCHYAN K.G., HOVHANNISSYAN D.D., SOGHOMONYAN V.S. METHOD OF ELECTRONIC CIRCUIT DISCONNECTION	130
GRIGORYAN F.P. CONTROL SYNTHESIS WITH DESIRABLE SPECTRUM IN REGU- LATING SYSTEM (RS) WHEN INPUT REGULATOR QUANTITY $m > 1$	138
GRIGORYAN T.A. ON ESTIMATION OF INTERNET-SERVICE WORK-VOLUME IN DATABASE REQUESTS	147
AZIZBEKYAN H.V., ARUTUNYAN E.A., KAZARYAN R.A., MANUKYAN A.M. NEW OPTICAL-MECHANICAL DEVICE DEVELOPMENT FOR SMALL TILT MEASUREMENTS	154
KHURDZE R.A. SOME NEW APPROACHES TO THE MATHEMATICAL THEORY OF RELIABILITY	159
STEPANYAN N.G. INVESTIGATION OF METAL-DIELECTRIC WAVEGUIDE EXCITER.....	167
MELIKYAN Z.A., GHAZARYAN H.S. METHOD FOR DETERMINING GAS THERMAL-PHYSICAL AND QUANTITATIVE PARAMETERS IN THE COURSE OF ITS INJECTION INTO UNDERGROUND GAS STORE	171
HAKOBYAN E.A., HOVSEPYAN V.S. A MATHEMATICAL MODEL OF ALTERNATING-DIRECT CURRENT ELECTRIC TRACTION DRIVE IN MOTION	179
EGHOYAN G.K., AVETISYAN K.H. NEW REQUERMENTS OF ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY	183