

ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԱԶԳԱՅԻՆ ԱԿԱԴԵՄԻԱՅԻ ԵՎ

ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԱԶԳԱՅԻՆ ՊՈԼԻՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆԻ

ՏԵԴԵԿՆԱԳԻՐ

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), **Ռ.Վ. ԱԹՈՅԱՆ** (գլխ. խմբ. տեղակալ),
Հ.Ա. ԹԵՐԶՅԱՆ (գլխ. խմբ. տեղակալ), **Ս.Ս. ՂԱԶԱՐՅԱՆ**, **Ո.Զ. ՄԱՐՈՒԽՅԱՆ**,
Ն.Վ. ՄԱՆՈՒԿՅԱՆ, **Ֆ.Տ. ՍԱՐԳՍՅԱՆ**, **ՅՈՒ.Լ. ՍԱՐԳՍՅԱՆ**, **Վ.Ս. ՍԱՐԳՍՅԱՆ**,
Մ.Գ. ՍՏԱԿՅԱՆ (գլխ. խմբ. տեղակալ), **Զ.Կ. ՍՏԵՓԱՆՅԱՆ** (պատասխանատու
քարտուղար), **Վ.Ս. ԽԱԶԱՏՐՅԱՆ**, **Հ.Զ. ՔՈՉԻՆՅԱՆ**

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Р.М. МАРТИРОСЯН (главный редактор), **Р.В. АТОЯН** (зам. глав. редактора),
С.М. КАЗАРЯН, **Г.ДЖ. КОЧИНЯН**, **Н.В. МАНУКЯН**, **В.З. МАРУХЯН**, **В.С.**
САРКИСЯН, **Ф.Т. САРКИСЯН**, **Ю.Л. САРКИСЯН**, **М.Г. СТАКЯН** (зам. глав.
редактора), **З.К. СТЕПАНИЯН** (ответ. секретарь), **А.А. ТЕРЗЯН** (зам. глав.
редактора), **В.С. ХАЧАТРЯН**

EDITORIAL BOARD

R.M. MARTIROSSYAN (Editorial-in-Chief), **R.V. ATOYAN** (Vice-Editor-in-Chief),
S.M. GHAZARYAN, **V.S. KHACHATRYAN**, **H.J. KOCHINYAN**, **N.V. MANOUKYAN**,
V.Z. MAROUKHYAN, **F.T. SARKISSYAN**, **V.S. SARKISSYAN**, **YU.L.. SARKISSYAN**,
M.G. STAKYAN (Vice-Editor-in-Chief), **Z.K. STEPANYAN** (Secretary - in - Chief),
H.A. TERZYAN (Vice-Editor-in-Chief)

Հրատ. խմբագիր՝

ԺԱՆՆԱ ՄԵՅՐԱՆՅԱՆ

Համակարգչային
շարվածքը
և ձեռավորումը՝

ԼԻԼԻԹ ՄԱՐՏԻՐՈՍՅԱՆԻ

Խմբագիրներ՝

ԼԵՅԼԱ ՍՏԵՓԱՆՅԱՆ
ՆԵԼԼԻ ԱՆԱՆՅԱՆ

© Издательство ГИУА

Известия НАН и ГИУ Армении (сер. техн. наук), 2003

Н.Е. САРКИСЯН, Н.Н. САРКИСЯН

ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА РАСПРОСТРАНЕНИЯ УСТАЛОСТНЫХ ТРЕЩИН ВБЛИЗИ КОНЦЕНТРАТОРА НАПРЯЖЕНИЙ В КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛАХ ПРИ ИХ ОСЕВОМ РАСТЯЖЕНИИ

Исследован процесс распространения усталостных трещин в стеклопластиках при многоцикловом осевом растяжении в зависимости от концентрации напряжений и изменения масштабного фактора испытываемых образцов. Установлено, что скорость распространения трещины зависит от размеров образца и тем выше, чем больше коэффициент масштабного фактора и значение циклического напряжения.

Ключевые слова: усталостные трещины, концентратор напряжений, циклическое напряжение, композитные материалы, растяжение.

Целью настоящей работы является исследование процесса распространения усталостных трещин вблизи концентратора напряжений в стекловолоконных композитных материалах при их осевом статическом растяжении.

Исследование развития кинетики трещин дает возможность как точного определения долговечности конструкции, так и обоснованного выбора оптимального критерия усталостной прочности и долговечности конструкции [1-3 и др.]. При этом особый интерес представляет изучение собственно самого процесса разрушения материала, в аспекте достоверной оценки его остаточной прочности и несущей способности, что может быть тесно связано с дальнейшим целевым использованием силовых конструкций.

В работе испытаны образцы с призматическим рабочим участком шириной ($b=15$ мм) и толщиной, равной толщине листа материала, изготовленного промышленным путем, которая составляла $t=1,0; 3,0$ и $5,0$ мм.

Таким образом, масштабный коэффициент образцов составляет $K_m=b/t=15,0; 5,0$ и $3,0$. Концентратор напряжения представляет собой центральное круговое отверстие диаметром 4 мм, просверленное перпендикулярно плоскости образца в форме двусторонней лопатки [4].

Для каждого из образцов усталостные испытания проведены при максимальном значении циклического напряжения, составляющем $0,1, 0,2$ и $0,3$ от предела прочности материала при кратковременном статическом растяжении. Первоначальное значение частоты циклического нагружения составляло 60 Гц и определялось значением жесткости образца в исходном состоянии. Испытания осуществлялись по принципу резонансного нагружения, когда текущее значение частоты нагружения определяется значением жесткости образца и может изменяться в процессе нагружения по мере изменения последнего.

Кривая кинетики повреждаемости каждого образца строилась по данным непрерывного наблюдения за частотой нагружения в условиях образования и развития трещин в материале. Амплитуда колебания образца в процессе испытания сохранялась неизменной. В качестве начала отсчета принимался момент времени, когда уменьшение исходного значения собственной частоты колебаний образца достигало 0,5%.

При данном уровне напряжений для построения кривой повреждаемости использовалось среднеарифметическое значение результатов испытания 3-5 образцов. Результаты испытания подвергались статистической обработке по методике малого числа наблюдений [5].

На основе опытных данных в системе координат $\lg D - \lg N$ построены кривые повреждаемости для каждого из образцов и результирующая кривая повреждаемости, которая строилась по осредненным данным. Результаты обработки данных представлены на рис.1, где кривые соответствуют результатам испытания каждого образца при заданном значении $K_\sigma=5,0$, а результирующая кривая получена путем соответствующей статистической обработки. Здесь числами указаны номера образцов.

Установлено, что закономерность изменения меры усталостной повреждаемости образца D в зависимости от числа циклов нагружения N в логарифмической системе координат для исследованного материала линейна.

Используя уравнение прямой в отрезках, получим

$$D = D_0(N/N_0)^m \quad (1)$$

или

$$\lg D = \gamma + m \lg N, \quad (2)$$

где γ - постоянный коэффициент, а $m = \lg(D_k/D_0) / \lg(N_k/N_0)$ - коэффициент интенсивности повреждаемости, зависящий от ряда параметров, влияющих на процесс развития трещины.

Здесь D_0 и D_k - меры повреждаемости, которые соответствуют началу и концу рассматриваемой фазы усталости, а N_0 и N_k - соответственно количество циклов нагружения этой области.

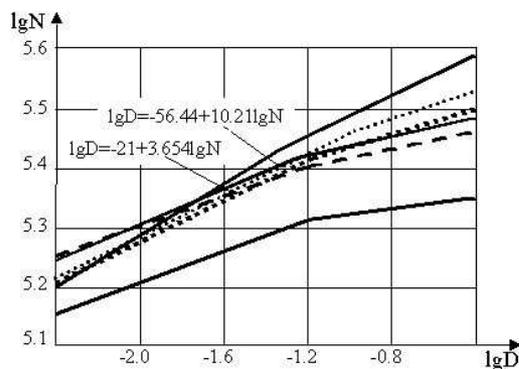


Рис.1

На основе экспериментальных результатов для образцов, испытанных в данной работе, были определены числовые значения всех параметров, входящих в уравнение повреждаемости.

Принимая, что предыстория нагружения образца мало влияет на процесс развития трещины при воздействии на него циклическим нагружением, как было показано в [6], существует такое минимальное значение напряжения $\sigma_{min} = U \cdot \sigma - 1$, при котором трещина не развивается. Учитывая это, из уравнения повреждаемости (1) можно заключить, что $D = D_0 = D_k$ и текущее значение количества циклов составляет $N = 10^6$ и представляет собой требуемое эксплуатационными условиями максимальное количество циклов нагружения, которое для полимерных композитных материалов может быть принято $N = 10^6 \dots 5 \cdot 10^6$.

Если N_0 заменить количеством циклов, соответствующих точке перегиба усталостной диаграммы N_0^{-1} , и учесть величину минимального напряжения циклов σ_{min} , то формулу (1) можно привести к следующему виду:

$$D = D_0 (N_0^\delta / N_0^1)^m. \quad (3)$$

Отсюда следует, что при напряжении, при котором приостанавливается дальнейшее распространение трещины в образце, коэффициент интенсивности $m = 0$.

Используя значения параметров кривой повреждаемости, полученных при статистической обработке экспериментальных данных, определены уравнения кривых усталости для образцов с различными значениями коэффициента масштабного фактора. Полученные результаты обобщены в таблице.

Для определения зависимости коэффициента интенсивности m от уровня напряжения кривые усталости для всех испытанных образцов перестроены в системе координат $\sigma \sim m$ (рис.2). Минимальное значение напряжения, независимо от масштабного фактора K_δ , принято одинаковым $\sigma_{min} = 100$ МПа. Здесь не учитывалось снижение условного предела усталостной прочности композита при распространении усталостной трещины в нем. При этом значение коэффициента интенсивности m было принято равным нулю.

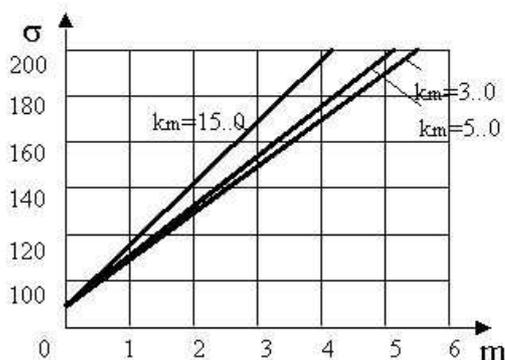


Рис.2

Полученные в настоящей работе результаты исследования не противоречат известным экспериментальным данным. Концентрация напряжений практически не влияет на интенсивность роста повреждаемости материала, а только снижает

значение величины долговечности, соответствующей моменту образования усталостных макротрещин. Это можно объяснить тем, что концентрация напряжений способствует более раннему возникновению усталостной трещины, а ее последующее развитие обусловлено лишь величиной циклической нагрузки и дальнейшей концентрацией напряжений в зоне распространения усталостной трещины.

Таблица

Усталостные кривые для долговечностей N_0 и N_k

$\sigma/4$	K_m	Уравнения усталостных кривых	$\sqrt{\langle \lg N^2 \rangle}$
1	3,0	$\lg N_0 = 5,0368 - 4,4023(\lg \sigma - 1,2757) \pm tq\sqrt{\langle \lg N^2 \rangle}$	0,0361
2		$\lg N_k = 5,2125 - 5,0422(\lg \sigma - 1,2757) \pm tq\sqrt{\langle \lg N^2 \rangle}$	0,0361
3	5,0	$\lg N_0 = 5,0629 - 3,4733(\lg \sigma - 1,2757) \pm tq\sqrt{\langle \lg N^2 \rangle}$	0,0553
4		$\lg N_k = 5,5242 - 4,4019(\lg \sigma - 1,2757) \pm tq\sqrt{\langle \lg N^2 \rangle}$	0,0487
5	15,0	$\lg N_0 = 5,3255 - 4,0635(\lg \sigma - 1,2757) \pm tq\sqrt{\langle \lg N^2 \rangle}$	0,0531
6		$\lg N_k = 5,5223 - 4,7431(\lg \sigma - 1,2757) \pm tq\sqrt{\langle \lg N^2 \rangle}$	0,0400

Из (1) можно получить скорость распространения усталостной повреждаемости для произвольного момента ее роста, которая равна

$$\frac{dD}{dN} = \frac{D_0 m}{N_0^m} N^{m-1}. \quad (4)$$

Из (2) следует, что показатель величины m не зависит от количества циклов N для данной области усталости. Следовательно, логарифмируя это уравнение, получим

$$\lg \frac{dD}{dN} = \lg \frac{D_0 m}{N_0^m} + (m-1) \lg N. \quad (5)$$

Отсюда следует, что скорость роста повреждаемости в течение времени возрастает по линейному закону, причем $\lg N \leq \lg N_k$.

В работе исследованы и рассчитаны скорости распространения усталостной повреждаемости и усталостной трещины в зависимости от напряжения и с учетом масштабного фактора. Полученные результаты показывают, что скорость распространения усталостных трещин зависит от размеров образца и тем выше, чем больше значение коэффициента K_m и больше величина действующего циклического напряжения. Установлено, что значение скорости распространения усталостной трещины, соответствующее началу стадии ускоренного развития повреждаемости материала, на порядок выше, чем на фазе образования микротрещин. Концентрация напряжений также влияет на скорость распространения усталостной трещины, в особенности, при увеличении действующей нагрузки.

Таким образом, на основе проведенных исследований можно заключить, что для образцов с концентратором напряжений и с различными значениями

коэффициента масштабного фактора, при небольших величинах циклического напряжения, скорость роста усталостной повреждаемости мало зависит от параметра усталостной повреждаемости D . Эта зависимость становится существенной только при больших значениях циклического напряжения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Малмейстер А.К., Тамуж В.П., Тетерс Г.А.** Сопrotивление полимерных и композитных материалов. – Рига: Зинатне. 3-е изд., перераб. и допол., 1980. – 572с.
2. **Серенсен С.В., Стреляев В.С.** Статическая конструкционная прочность стеклопластиков // Вестник машиностроения. -1962. - № 3. – С. 3-9.
3. **Немец Я., Серенсев С.В., Стреляев В.С.** Прочность пластмасс. – М.: Машиностроение, 1970. –335 с.
4. **Саркисян Н.Н., Саркисян Н.Е.** Характер повреждения композитных материалов и оценка снижения их прочности при циклическом деформировании // Изв. НАН РА. Механика. – 2000. -Т.53. - С. 78-82.
5. **Митропольский А.К.** Техника статистических вычислений. –М.: Физматгиз, 1961. -368 с.
6. **Кручинин В.В., Сафронов Ю.Д.** Изучение скорости распространения усталостных трещин по замерам прогибов образца // Прочность металлов при циклических нагрузках: Сб.тр. – М.: Наука, 1967. - 362 с.

ГУАСА. Материал поступил в редакцию 10.05.2002.

Ն.Ե. ՍԱՐԳՍՅԱՆ, Ն.Ն. ՍԱՐԳՍՅԱՆ ՀՈԳՆԱԾՍԱՅԻՆ ՃԱՔԵՐԻ ՏԱՐԱԾՄԱՆ ԱՌԱՆՁՆԱՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԸ ԼԱՐՄԱՆ ԽՏԱՐԱՐԻ ՄՈՏԵՐՔՈՒՄ ԿՈՄՊՈԶԻՏԻՎ ՆՅՈՒԹԵՐԻ ԱՌԱՆՑՔԱՅԻՆ ՁԳՄԱՆ ԴԵՊՔՈՒՄ

Հետազոտված է հոգնածային ճաքերի տարածումը ապակեպլաստներում բազմացիկլային առանցքային ճգման դեպքում՝ կախված լարումների խտարարի և փորձարկվող նմուշների մասշտաբային գործոնի փոփոխությունից: Սահմանված է, որ ճաքի տարածման արագությունը կախված է նմուշի չափերից և այնքան մեծ է, ինչքան մեծ են մասշտաբային գործոնի արժեքը և ցիկլային լարման մեծությունը:

N.E. SARGSYAN, N.N. SARGSYAN FATIGUE CRACK DIFFUSION IN PECULIARITIES NEAR THE STRESS CONCENTRATOR IN COMPOSITE MATERIALS DURING THEIR AXIAL TENSION

Fatigue crack distribution in fiberglass plastics under multi-cyclic axial tension in terms of stress concentration and scale factor change of tested samples is investigated It is stated that the crack speed distribution depends on the model size, and the higher the speed, the more the scale factor and the cycle stress value.

М.Г. СТАКЯН, А.Р. ДЕМИРХАНЫ

УРАВНЕНИЕ КРИВОЙ УСТАЛОСТИ С УЧЕТОМ ПОРОГА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ПО ДОЛГОВЕЧНОСТЯМ**Сообщение 2. Семейства квантильных кривых усталости и их доверительных интервалов**

Даны расчетные схемы и алгоритм для определения параметров медианных кривых усталости валов с учетом порога чувствительности, когда уровень перенапряжений σ_i является детерминированной величиной. Предложенные схемы охватывают случаи, когда: дисперсии циклических долговечностей переменны от σ_i ; практически постоянны; на каждом уровне σ_i испытано по 1...3 образца. Для повышения точности расчетов разработана методика получения семейства квантильных кривых усталости с их доверительными интервалами. Рассмотрен численный пример.

Ключевые слова: кривая усталости, порог чувствительности, циклическая долговечность, доверительный интервал.

Тенденция снижения материалоемкости конструкций машин и инженерных сооружений привела к повышению общей напряженности их ответственных деталей и соединений, которые в большинстве случаев работают в области ограниченной выносливости под действием низких перенапряжений, ограничивающих срок их службы. Это диктует необходимость совершенствования расчетных методик показателей сопротивления усталости и уточнения математической модели усталостного разрушения – уравнения кривой усталости, с учетом интегрального действия различных факторов материаловедческого, технологического и эксплуатационного характера. Такой подход подразумевает применение обоснованных расчетных методик с учетом доверительной вероятности, что возможно лишь при приведении данных экспериментов к нормальному закону распределения и получении семейств квантильных линий усталости с их доверительными границами.

Испытания на усталость, проводимые с целью получения параметров уравнения кривой усталости, среди прочих механических испытаний имеют свои характерные особенности:

а) они сопровождаются неизбежным рассеянием циклических долговечностей, которые весьма значительны для деталей с выраженной анизотропией материала и неравновесной микроструктурой, для соединений, а также при испытаниях в средах и др. При этом средние значения и показатели рассеяния основных статистик зависят от многочисленных факторов и, в первую очередь, от уровня циклических перенапряжений σ_i ;

б) вариационные ряды долговечностей отклоняются от логарифмически нормального закона, в связи с чем проведено комплексное исследование порога чувствительности N_{oi} [1] с целью уточнения закона распределения долговечностей;

в) в отличие от общей схемы двумерных корреляционных связей здесь применены методы линейного регрессионного анализа и выявлены связи между детерминированными ($\lg \sigma_i$) и случайными ($\lg N_i$) переменными.

Первые две особенности проявляются лишь при реализации массовых испытаний, а третья - диктует необходимость коренным образом изменить математическую модель процесса усталостного разрушения.

Анализ и классификация действующих факторов привели к следующим вариантам расчетных схем (в качестве экспериментального подтверждения выдвинутых положений использованы данные массовых испытаний [2]):

- а) схема №1 – дисперсия долговечностей переменна от уровня перенапряжений σ_i ;
- б) схема №2 – дисперсия долговечностей практически постоянна и не зависит от σ_i ;
- в) схема №3 – данные малочисленны (по 1...3 испытаниям на каждом уровне σ_i), что не позволяет выявить характер рассеяния долговечностей N_i .

Уравнение кривой усталости с учетом порога чувствительности по долговечностям N_{oi} , как уравнение медианной линии регрессии, имеет вид

$$X'_y = \bar{x}' + b(y - \bar{y}) = a + b(y - \bar{y}), \quad (1)$$

где

$$\bar{x}' = a = \frac{\sum_{i=1}^m f_6(\sigma_i) n_i \bar{x}'_i}{\sum_{i=1}^m f_6(\sigma_i) n_i}, \quad \bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^m f_6(\sigma_i) n_i y_i}{\sum_{i=1}^m f_6(\sigma_i) n_i}, \quad b = \frac{\sum_{i=1}^m f_6(\sigma_i) n_i (y_i - \bar{y}) \bar{x}'_i}{\sum_{i=1}^m f_6(\sigma_i) n_i (y_i - \bar{y})^2}, \quad (2)$$

$$\bar{x}'_i = \sum_{j=1}^{n_i} x'_{ij} / n_i, \quad \bar{y} = \sum_{i=1}^m y_i n_i / \sum_{i=1}^m n_i, \quad s_i'^2 = f_6(\sigma_i) = a_3 + b_3 y_i \quad [1],$$

$f_6(\sigma_i)$ – “весовая” функция дисперсий $s_i'^2$ вариационных рядов x'_{ij} [3]:

$$x'_{i1} \leq x'_{i2} \leq x'_{i3} \leq \dots \leq x'_{ij} \leq \dots \leq x'_{in_i}, \quad x'_{ij} = \lg(N_{ij} - N_{oi}), \quad i = \overline{1, m}, \quad j = \overline{1, n_i},$$

$y_i = \lg \sigma_i$, N_{ij} - полная долговечность j -го члена i -го вариационного ряда.

Выбор расчетной схемы зависит от вида “весовой” функции, поэтому предварительно необходимо проверить “нулевую” гипотезу однородности дисперсий $s_i'^2$ вариационных рядов согласно критерию Бартлета [3]:

$$\chi^2 = \frac{2,3026}{c} \left[\left(\sum_{i=1}^m n_i - m \right) \lg s'^2 - \sum_{i=1}^m (n_i - 1) \lg s_i'^2 \right] \leq \chi_\alpha^2, \quad (3)$$

$$\text{где } c = \frac{1}{3(m-1)} \left[\sum_{i=1}^m \frac{1}{(n_i-1)} - \frac{1}{\sum_{i=1}^m n_i - m} \right], \quad s'^2 = \frac{\sum_{i=1}^m (n_i-1) s_i'^2}{\sum_{i=1}^m n_i - m},$$

χ_α^2 - критическое значение χ^2 для надежности вывода $\alpha = 0,05$ и при числе "степеней свободы" $k = (m-1)$.

При $\chi^2 > \chi_\alpha^2$ "нулевая" гипотеза однородности дисперсий $s_i'^2$ отвергается, и расчеты ведутся согласно схеме 1 1.

1. Расчетная схема №1. Определяют параметры a, b, \bar{y} согласно (1), для чего составляют регрессионную таблицу (табл., столбцы 1-17). Линейность регрессионной связи проверяют согласно критерию F -Фишера:

$$F = s_1^2 / s_2^2 \leq F_{1-\alpha}, \quad (4)$$

где $s_1^2 = \sum_{i=1}^m f_6(\sigma_i) n_i (\bar{x}'_i - X'_{yi})^2 / (m-2)$ - дисперсия вокруг линии регрессии;

$s_2^2 = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n_i} f_6(\sigma_i) (x'_{ij} - \bar{x}'_i)^2 / \left(\sum_{i=1}^m n_i - m \right)$ - внутренняя (остаточная) дисперсия;

$X'_{yi} = a + b(y_i - \bar{y})$; $F_{1-\alpha}$ - критическое значение F при $\alpha = 0,05$, $k_1 = m-2$,

$$k_2 = \sum_{i=1}^m n_i - m.$$

При $F \leq F_{1-\alpha}$ линейность регрессии подтверждается, а s_1^2 и s_2^2 объединяют в общую дисперсию:

$$s^2 = \left[(m-2)s_1^2 + \left(\sum_{i=1}^m n_i - m \right) s_2^2 \right] / \left(\sum_{i=1}^m n_i - 2 \right) \quad (5)$$

и дополняют таблицу (табл., столбцы 18-20). Определяют дисперсии параметров линии регрессии (1):

$$s_a^2 = \frac{s^2}{\sum_{i=1}^m f_6(\sigma_i) n_i}, \quad s_b^2 = \frac{s^2}{\sum_{i=1}^m f_6(\sigma_i) n_i (y_i - \bar{y})^2}, \quad s_{X'_i}^2 = s_a^2 + s_b^2 (y_i - \bar{y})^2 \quad (6)$$

и проверяют значимость параметров (6) по критерию Стьюдента:

$$t_a = |a|/s_a \geq t_{\alpha,k}, \quad t_b = |b|/s_b \geq t_{\alpha,k}, \quad t_{X'_i} = X'_{yi}/s_{X'_i} \geq t_{\alpha,k}, \quad (7)$$

где $t_{\alpha,k}$ - критическое значение t при $\alpha = 0,05$ и $k = \sum_{i=1}^m n_i - 2$.

Рассчитывают доверительные границы параметров a, b , а также медианной линии регрессии:

$$a_1 < A < a_2, \quad b_1 < B < b_2, \quad X'_{yi1} < X'_{yi} < X'_{yi2}, \quad (8)$$

где $a_{1,2} = a \mp t_{\alpha,k} s_a$, $b_{1,2} = b \mp t_{\alpha,k} s_b$, $X'_{yi1,2} = X'_{yi} \mp t_{\alpha,k} s_{X'_i}$.

Значения s_{x_i} и $X'_{yi,2}$ (табл., столбцы 21-23) используют для построения доверительных границ медианной линии регрессии (кривой усталости).

2. Расчетная схема 2. При $\chi^2 \leq \chi^2_\alpha$ “нулевая” гипотеза однородности дисперсий $s_i'^2$ принимается, и считается, что “весовая” функция становится постоянной: $f_0(\sigma_i) = 1$. При этом согласно упрощенным зависимостям (1)-(8) составляют расчетный алгоритм и формируют аналогичную регрессионную таблицу.

3. Расчетная схема 1 3. При выполнении $n_i = 1 \dots 3$ испытаний на каждом уровне σ_i становится невозможной реализация дисперсионного анализа и, следовательно, расчетного алгоритма согласно схемам NN№1 и 2. Поэтому из номограммы или корреляционного уравнения $x_{oi} = a_2 + b_2 \lg \sigma_i$ [1] определяют значения $x_{oi} = \lg N_{oi}$ для каждого уровня $y_i = \lg \sigma_i$, а затем рассчитывают все $x'_i = \lg(N_i - N_{oi})$, $i = \overline{1, m}$, по которым и определяют параметры a , b и \bar{y} уравнения медианной линии регрессии (1), где

$$x' = a = \sum_{i=1}^m x'_i / m, \quad \bar{y} = \sum_{i=1}^m y_i / m, \quad b = \sum_{i=1}^m (y_i - \bar{y}) x'_i / \sum_{i=1}^m (y_i - \bar{y})^2. \quad (9)$$

Линейность регрессии из-за ограниченного числа испытаний в первом приближении проверяют методом линейного корреляционного анализа с помощью коэффициента корреляции:

$$|r| = |\mu| / s_y s'_x \geq 0,75, \quad (10)$$

где

$$\mu = \frac{1}{(m-1)} \sum_{i=1}^m (x'_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}), \quad s_y = \sqrt{\frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (y_i - \bar{y})^2},$$

$$s'_x = \sqrt{\frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (x'_i - \bar{x}')^2}. \quad (11)$$

Определяют дисперсии параметров линии регрессии:

$$s_a^2 = s^2 / m, \quad s_b^2 = s^2 / \sum_{i=1}^m (y_i - \bar{y})^2, \quad s_{x'_i}^2 = s_a^2 + s_b^2 (y_i - \bar{y})^2, \quad (12)$$

где $s^2 = \frac{1}{(m-2)} \sum_{i=1}^m (x'_i - X'_{yi})^2$, $X'_{yi} = a + b(y_i - \bar{y})$.

Проверяют значимость параметров по критерию Стьюдента, определяют доверительные интервалы a , b и медианной линии регрессии согласно (7), (8), а затем составляют упрощенную регрессионную таблицу.

4. Семейство квантильных кривых усталости. Стремление повысить точность вероятностных значений исследуемых параметров приводит к расчету квантильных кривых усталости с их доверительными границами. Однако расчетные схемы NN№1-3 предоставляют эту возможность только для медианной кривой усталости. Применение метода прямых испытаний для реализации данной задачи затруднено в связи с необходимостью многократного повторения (десятки раз) массовых

испытаний типа [2], что экономически необоснованно, а иногда и невозможно. Другим вариантом решения задачи является организация статистического (виртуального) эксперимента, генерация (применяя данные [2]) и многократное формирование случайных выборок долговечностей N_{ij}^* , которые на каждом уровне σ_i с заданной вероятностью (обычно 90%-й) покрыли бы доверительную область долговечностей и имитировали бы режим работы парка испытательных машин усталостной лаборатории.

Таблица

i	Вариационные ряды x'_{ij} ($i = \overline{1, m}, j = \overline{1, n_i}$)	n_i	\bar{x}'_i	$\sum_{j=1}^{n_i} (x'_{ij} - \bar{x}'_i)^2$	$s_i'^2$	$f_6(\sigma_i)$
1	$x'_{11}, x'_{12}, x'_{13}, \dots, x'_{1j}, \dots, x'_{1n_1}$	n_1	\bar{x}'_1	$\sum_{j=1}^{n_1} (x'_{1j} - \bar{x}'_1)^2$	$s_1'^2$	$f_6(\sigma_1)$
2	$x'_{21}, x'_{22}, x'_{23}, \dots, x'_{2j}, \dots, x'_{2n_2}$	n_2	\bar{x}'_2	$\sum_{j=1}^{n_2} (x'_{2j} - \bar{x}'_2)^2$	$s_2'^2$	$f_6(\sigma_2)$
3	$x'_{31}, x'_{32}, x'_{33}, \dots, x'_{3j}, \dots, x'_{3n_3}$	n_3	\bar{x}'_3	$\sum_{j=1}^{n_3} (x'_{3j} - \bar{x}'_3)^2$	$s_3'^2$	$f_6(\sigma_3)$
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
i	$x'_{i1}, x'_{i2}, x'_{i3}, \dots, x'_{ij}, \dots, x'_{ini}$	n_i	\bar{x}'_i	$\sum_{j=1}^{n_i} (x'_{ij} - \bar{x}'_i)^2$	$s_i'^2$	$f_6(\sigma_i)$
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
m	$x'_{m1}, x'_{m2}, x'_{m3}, \dots, x'_{mj}, \dots, x'_{mmm}$	n_m	\bar{x}'_m	$\sum_{j=1}^{n_m} (x'_{mj} - \bar{x}'_m)^2$	$s_m'^2$	$f_6(\sigma_m)$

Продолжение табл.

$f_6(\sigma_i)n_i$	$f_6(\sigma_i)n_i\bar{x}'_i$	y_i	$f_6(\sigma_i)n_i y_i$	$(y_i - \bar{y})$	$(y_i - \bar{y})^2$
$f_6(\sigma_1)n_1$	$f_6(\sigma_1)n_1\bar{x}'_1$	y_1	$f_6(\sigma_1)n_1 y_1$	$(y_1 - \bar{y})$	$(y_1 - \bar{y})^2$
$f_6(\sigma_2)n_2$	$f_6(\sigma_2)n_2\bar{x}'_2$	y_2	$f_6(\sigma_2)n_2 y_2$	$(y_2 - \bar{y})$	$(y_2 - \bar{y})^2$
$f_6(\sigma_3)n_3$	$f_6(\sigma_3)n_3\bar{x}'_3$	y_3	$f_6(\sigma_3)n_3 y_3$	$(y_3 - \bar{y})$	$(y_3 - \bar{y})^2$
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
$f_6(\sigma_i)n_i$	$f_6(\sigma_i)n_i\bar{x}'_i$	y_i	$f_6(\sigma_i)n_i y_i$	$(y_i - \bar{y})$	$(y_i - \bar{y})^2$
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
$f_6(\sigma_m)n_m$	$f_6(\sigma_m)n_m\bar{x}'_m$	y_m	$f_6(\sigma_m)n_m y_m$	$(y_m - \bar{y})$	$(y_m - \bar{y})^2$

Продолжение табл.

$f_6(\sigma_i)n_i(y_i - \bar{y})\bar{x}'_i$	$f_6(\sigma_i)n_i(y_i - \bar{y})^2$	$(n_i - 1)lg s_i'^2$	$1/(n_i - 1)$
$f_6(\sigma_1)n_1(y_1 - \bar{y})\bar{x}'_1$	$f_6(\sigma_1)n_1(y_1 - \bar{y})^2$	$(n_1 - 1)lg s_1'^2$	$1/(n_1 - 1)$
$f_6(\sigma_2)n_2(y_2 - \bar{y})\bar{x}'_2$	$f_6(\sigma_2)n_2(y_2 - \bar{y})^2$	$(n_2 - 1)lg s_2'^2$	$1/(n_2 - 1)$
$f_6(\sigma_3)n_3(y_3 - \bar{y})\bar{x}'_3$	$f_6(\sigma_3)n_3(y_3 - \bar{y})^2$	$(n_3 - 1)lg s_3'^2$	$1/(n_3 - 1)$
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
$f_6(\sigma_i)n_i(y_i - \bar{y})\bar{x}'_i$	$f_6(\sigma_i)n_i(y_i - \bar{y})^2$	$(n_i - 1)lg s_i'^2$	$1/(n_i - 1)$
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
$f_6(\sigma_m)n_m(y_m - \bar{y})\bar{x}'_m$	$f_6(\sigma_m)n_m(y_m - \bar{y})^2$	$(n_m - 1)lg s_m'^2$	$1/(n_m - 1)$

Продолжение табл.

$f_6(\sigma_i)\sum_{j=1}^{n_i}(x'_{ij} - \bar{x}'_i)^2$	X'_{yi}	$f_6(\sigma_i)n_i(\bar{x}'_i - X'_{yi})^2$	$s_{X'_i}$	$t_{X'_i}$	$X'_{yi} \mp t_{\alpha,k} s_{X'_i}$
$f_6(\sigma_1)\sum_{j=1}^{n_1}(x'_{1j} - \bar{x}'_1)^2$	X'_{y1}	$f_6(\sigma_1)n_1(\bar{x}'_1 - X'_{y1})^2$	$s_{X'_1}$	$t_{X'_1}$	$X'_{y1} \mp t_{\alpha,k} s_{X'_1}$
$f_6(\sigma_2)\sum_{j=1}^{n_2}(x'_{2j} - \bar{x}'_2)^2$	X'_{y2}	$f_6(\sigma_2)n_2(\bar{x}'_2 - X'_{y2})^2$	$s_{X'_2}$	$t_{X'_2}$	$X'_{y2} \mp t_{\alpha,k} s_{X'_2}$
$f_6(\sigma_3)\sum_{j=1}^{n_3}(x'_{3j} - \bar{x}'_3)^2$	X'_{y3}	$f_6(\sigma_3)n_3(\bar{x}'_3 - X'_{y3})^2$	$s_{X'_3}$	$t_{X'_3}$	$X'_{y3} \mp t_{\alpha,k} s_{X'_3}$
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
$f_6(\sigma_i)\sum_{j=1}^{n_i}(x'_{ij} - \bar{x}'_i)^2$	X'_{yi}	$f_6(\sigma_i)n_i(\bar{x}'_i - X'_{yi})^2$	$s_{X'_i}$	$t_{X'_i}$	$X'_{yi} \mp t_{\alpha,k} s_{X'_i}$
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
$f_6(\sigma_m)\sum_{j=1}^{n_m}(x'_{mj} - \bar{x}'_m)^2$	X'_{ym}	$f_6(\sigma_m)n_m(\bar{x}'_m - X'_{ym})^2$	$s_{X'_m}$	$t_{X'_m}$	$X'_{ym} \mp t_{\alpha,k} s_{X'_m}$

Более доступным является метод косвенных испытаний, когда экспериментальные данные заменяются расчетными, полученными из уравнений эмпирических линий нормального распределения, определенных, согласно данным [2], на каждом уровне σ_i с учетом порога чувствительности N_{oi} [1]:

$$\hat{x}'_{i_{pj}} = \bar{x}'_i + z_{P_j} s'_{xi}, \quad i = \overline{1, m}, \quad j = \overline{1, k}, \quad (13)$$

где $\hat{x}'_{i_{pj}}$ - расчетное значение $\lg N'_{ip}$, соответствующее заданному уровню вероятности P_j , принятому равным $P_j = 0,5, 0,9, 0,95, 0,99$ и $0,999$ ($z_{P_j} = 0, -1,28, -1,65, -2,33$ и $-3,09$), $k = 5$ - количество уровней P_j .

Согласно (13), для принятых P_j рассчитывают значения $\hat{x}'_{i_{pj}}$:

$$\begin{matrix} P_1 & P_2 & P_3 & \dots & P_i & \dots & P_k \\ \left\{ \begin{array}{l} \hat{x}'_{1_{p1}}, \hat{x}'_{1_{p2}}, \hat{x}'_{1_{p3}}, \dots, \hat{x}'_{1_{pj}}, \dots, \hat{x}'_{1_{pk}}, \\ \hat{x}'_{2_{p1}}, \hat{x}'_{2_{p2}}, \hat{x}'_{2_{p3}}, \dots, \hat{x}'_{2_{pj}}, \dots, \hat{x}'_{2_{pk}}, \\ \hat{x}'_{3_{p1}}, \hat{x}'_{3_{p2}}, \hat{x}'_{3_{p3}}, \dots, \hat{x}'_{3_{pj}}, \dots, \hat{x}'_{3_{pk}}, \\ \vdots \\ \hat{x}'_{i_{p1}}, \hat{x}'_{i_{p2}}, \hat{x}'_{i_{p3}}, \dots, \hat{x}'_{i_{pj}}, \dots, \hat{x}'_{i_{pk}}, \\ \vdots \\ \hat{x}'_{m_{p1}}, \hat{x}'_{m_{p2}}, \hat{x}'_{m_{p3}}, \dots, \hat{x}'_{m_{pj}}, \dots, \hat{x}'_{m_{pk}}, \end{array} \right. & \begin{array}{l} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ \vdots \\ y_i \\ \vdots \\ y_m \end{array} \end{matrix} \quad (14)$$

Двумерный “массив” данных при $P_j = const$ (столбцы): $(\hat{x}'_{1_{pj}}, y_1)$, $(\hat{x}'_{2_{pj}}, y_2)$, $(\hat{x}'_{3_{pj}}, y_3)$, ..., $(\hat{x}'_{i_{pj}}, y_i)$, ..., $(\hat{x}'_{m_{pj}}, y_m)$ обрабатывается согласно схеме №3. В результате получают квантильную кривую усталости с доверительным интервалом. Поступая аналогичным образом для всех данных при $P_1, P_2, P_3, \dots, P_j, \dots, P_k$, получим семейства квантильных кривых усталости с их доверительными границами, что значительно повышает точность расчетов за счет ввода процедуры двойной вероятностной оценки исследуемых параметров с учетом порога чувствительности.

На рисунке представлено указанное семейство согласно данным [2], рассчитанное и графически оформленное по программному пакету SMDA4.

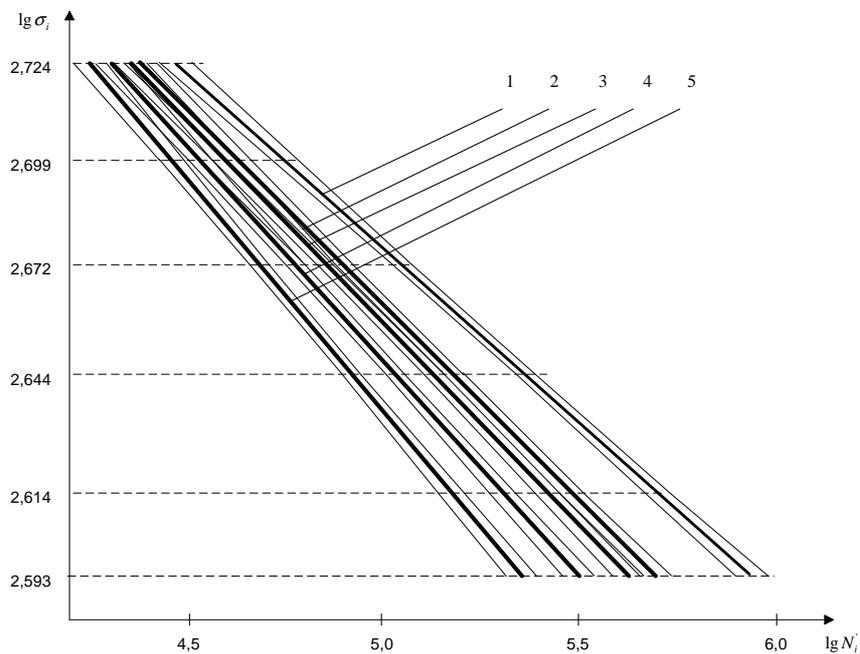


Рис. Семейство квантильных кривых усталости и их 90%-ых доверительных интервалов.
 Линии 1-5 соответствуют $P = 0,5, 0,9, 0,95, 0,99$ и $0,999$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Стакян М.Г., Демирханян А.Р.** Уравнение кривой усталости с учетом порога чувствительности по долговечностям. Сообщ. 1. Исследование порога чувствительности // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН.- 2002.- Т.55, № 3.- С.338 - 347.
2. **Бастенер Ф., Бастъен М., Поме Ж.** Статистический анализ результатов новых усталостных испытаний // Усталость и выносливость металлов: Сб. ст. - М.: ИЛ, 1963. - С. 390-406.
3. **Степнов М.Н.** Статистические методы обработки результатов механических испытаний: Справ. - М.: Машиностр., 1985. - 232 с.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 23.05.2001.

Մ.Գ. ՍՏԱԿՅԱՆ, Ա.Ռ. ԴԵՄԻՐԽԱՆՅԱՆ

**ՀՈԳՆԱԾԱՅԻՆ ԿՈՐԻ ՀԱՎԱՍԱՐՈՒՄԸ ԵՐԿԱՐԱԿԵՑՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ
ԶԳԱՅՆՈՒԹՅԱՆ ՇԵՄԻ ՀԱՇՎԱՌՄԱՍԲ**

**Հաղորդում 2. Հոգնածային քվանտիլային կորերի ընտանիքները եւ դրանց
վստահական միջակայքերը**

Տրված են հաշվարկային սխեմաներ և ալգորիթմ՝ լիսենների հոգնածային միջնարժեքային կորերի պարամետրերը զգայնության շեմի հաշվառմամբ որոշելու համար, երբ σ_i գերլարումների մակարդակը դետերմինացված մեծություն է: Առաջադրված սխեմաներն ընդգրկում են հետևյալ դեպքերը. ցիկլային երկարակեցությունների ցրվածքները σ_i -ից փոփոխական են, σ_i -ի նկատմամբ գործնականում հաստատուն են, σ_i -ի յուրաքանչյուր մակարդակով փորձարկված է 1...3 փորձանմուշ: Հաշվարկների ճշտությունը բարձրացնելու նպատակով մշակված է քվանտիլային հոգնածային կորերի և դրանց վստահական միջակայքերի ընտանիքների ստացման մեթոդիկա: Դիտարկված է թվային օրինակ:

M. G. STAKYAN, A.R. DEMIRKHANYAN

**EQUATION OF STRESS-CYCLE DIAGRAM WITH ACCOUNT OF LONGEVITY
SENSITIVITY THRESHOLD
REPORT 2. A FAMILY OF QUANTUM FATIGUE CURVES AND THEIR
CONFIDENCE INTERVALS**

Calculation schemes and algorithms for determining roller fatigue curve median parameters are given, taking into account the “sensitivity threshold”, when overstrain level of σ_1 is a deterministic value. The submitted schemes included cases: when dispersion of cyclic longevity are variables; when on each level of σ_1 1...3 models are tested. To increase the calculation accuracy, the method of obtaining quantile curve fatigue families with their confidence intervals is developed. A numerical example is examined.

А. Р. ПАПЛЯН

СООСНЫЕ РОТОРЫ В ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ РАБОЧИХ ОРГАНАХ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАШИН И УСТОЙЧИВОСТЬ ИХ ПОЛОЖЕНИЯ РАВНОВЕСИЯ

Предлагаются новые конструкции текстильных высокоскоростных шпинделей на основе применения двухроторной соосной системы. Анализированы конструктивные особенности предложенных узлов. Теоретически изучена устойчивость положения равновесия соосной двухроторной системы, если опоры роторов имеют нелинейную характеристику жесткости в виде параболической зависимости второй степени. Разработаны рекомендации по выбору оптимальных параметров характеристик жесткости нелинейных опор.

Ключевые слова: двухроторная соосная система, устойчивость, оптимальные параметры.

В текстильном производстве многие технологические процессы, например, кручение, прядение, трощение и т.д., осуществляются с помощью различных роторных систем. В большинстве случаев повышение частоты вращения роторов остается основным средством увеличения производительности этой группы технологических машин.

Для преодоления этой проблемы предлагаются новые технические решения при конструировании узлов таких систем. При этом, естественно, возникает необходимость проведения новых теоретических и экспериментальных исследований с целью обоснованного выбора оптимальных параметров вновь проектируемых роторных систем.

Одним из способов существенного увеличения частоты вращения рабочих органов текстильных машин является использование соосных роторных систем при их конструировании.

В текстильных машинах конструкция с соосным ротором для высокоскоростной прядильной камеры впервые предлагалась в [1].

На рис. 1а приведена конструктивная схема этой прядильной камеры. Она состоит из корпуса 1, в котором установлен промежуточный ротор 2, опирающийся на подшипники 3, которые находятся в упругих кольцах 4. В промежуточном роторе соосно с ним вмонтирован основной ротор – шпиндель 5 камеры 6. Основной ротор также опирается на подшипники 7, которые находятся в упругих кольцах 8. Шпиндель получает вращение с угловой скоростью ω_1 от ремня 9. На шпинделе и промежуточном роторе закреплены диски a и b , на торцевой поверхности которых попарно друг против друга установлены разнополюсные магниты 10 и 11, с помощью которых промежуточный ротор получает вращение в сторону шпинделя с угловой скоростью ω_2 . За счет этого снижается относительная скорость между наружным и внутренним звеньями подшипников и тем самым появляется дополнительный резерв для увеличения частоты вращения шпинделя.

В конструкции оба ротора установлены на упругие опоры, чтобы создать для них условия самоцентрирования [2]. Недостатком рассмотренной конструкции является ненадежность кинематической связи между роторами (магнитная передача движения от основного ротора к промежуточному).

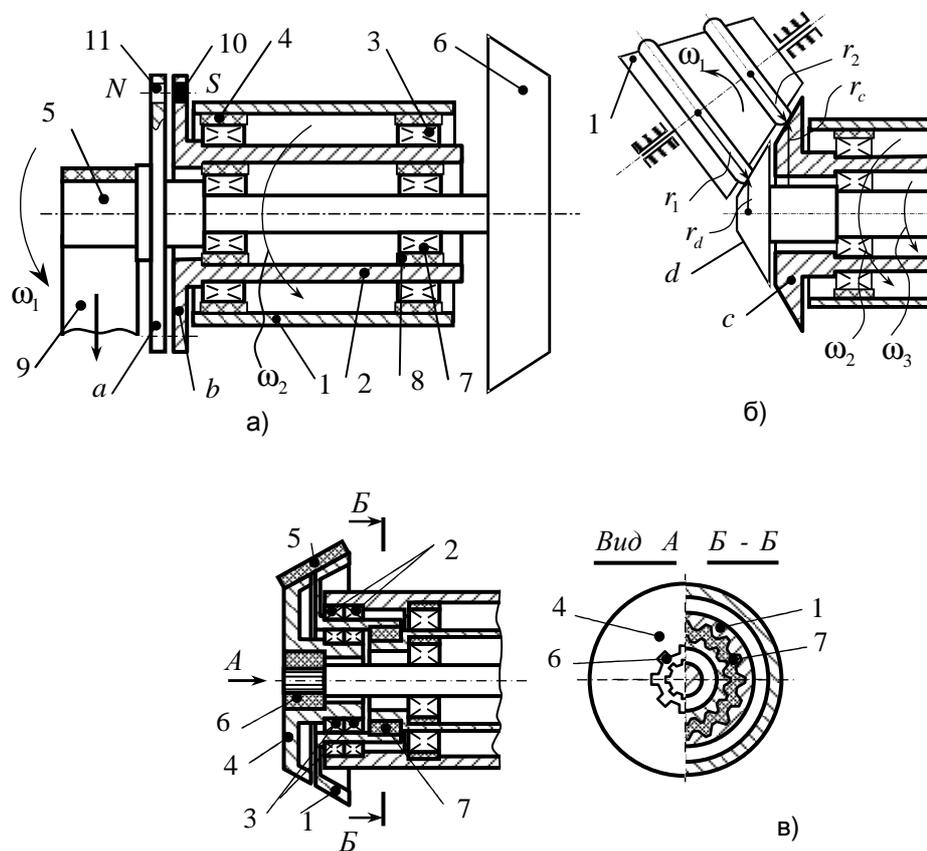


Рис.1

Этот недостаток устранен в другой конструкции прядильной камеры с соосным ротором [3]. На рис. 1б приведена конструктивная схема камеры. Конструкция аналогична ранее рассмотренной, с одним отличием, что в этом случае в конце основного и промежуточного роторов вместо дисков предусмотрены конические шкивы c, d , которые приводятся во вращение с помощью приводного конического шкива 1 (рис.1б). Благодаря разным радиусам в точках контакта со шкивами основного и промежуточного роторов r_1, r_2, r_d, r_c обеспечиваются разные угловые скорости их вращения. Однако в этой конструкции, как и в первой, есть недостаток: отрицательное воздействие радиальных сил от конической передачи на упруго опертый шпиндель, затрудняющий процесс самоцентрирования роторов.

Для устранения этого недостатка нами предложена новая конструкция прядильной камеры с соосным ротором (рис.1в) [4]. В этой конструкции установленные в упругих опорах два соосных ротора отделены от своих приводных шкивов. Приводной шкив 1 промежуточного ротора через подшипники 2 установлен

в корпус узла. Внутри этого шкива через подшипники 3 соосно установлен приводной шкив 4 основного ротора. Эти шкивы приводятся во вращение с помощью ремня 5. Так как подшипниковые опоры установлены без упругих элементов, то радиальные силы, действующие со стороны приводного ремня, не передаются промежуточному и основному роторам, опоры которых установлены на упругих подушках. Крутящие моменты от шкивов к роторам передаются через упругие специальные шлицевые элементы 6 и 7 малой жесткости.

Для динамического исследования приведенных конструкций прядильных камер, с целью выбора оптимальных параметров и условий их эксплуатации, рассмотрена единая динамическая модель, проведены необходимые расчеты [5].

Расчеты позволяют при проектировании прядильных камер с двумя соосными роторами выбрать такие параметры конструкции, с помощью которых можно отстроить критические частоты от рабочих частот вращения основного и промежуточного роторов и обеспечить устойчивость, надежность и долговечность работы всего узла.

При изучении динамической модели выявлено еще одно положительное свойство конструкций прядильных камер с двумя соосными роторами. Анализ вариантов показывает, что в определенных случаях промежуточный (тихоходный) ротор для основного (быстроходного) ротора может выполнять функцию динамического гасителя колебаний последнего. Это свойство тоже необходимо целенаправленно использовать при проектировании новых конструкций прядильных камер.

Для оптимального проектирования таких систем, параллельно с этой задачей, необходимо анализировать и вопрос устойчивости положения равновесия роторов системы с целью обеспечения нормального протекания технологического процесса. Устойчивость системы оценена критерием Сильвестра. Согласно этому критерию, положение равновесия устойчиво, если в его близости потенциальная энергия системы имеет изолированный минимум. Выражение потенциальной энергии имеет изолированный минимум, если выполняются следующие условия [6]:

$$q_{11} > 0, \quad \begin{vmatrix} q_{11} & q_{12} \\ q_{21} & q_{22} \end{vmatrix} > 0, \dots, \quad \begin{vmatrix} q_{11} & q_{12} & \dots & q_{1n} \\ q_{21} & q_{22} & \dots & q_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ q_{n1} & q_{n2} & \dots & q_{nn} \end{vmatrix} > 0, \quad (1)$$

где $q_{11}, \dots, q_{nn}, \dots, q_{1n}, \dots, q_{n1}$ - вторые и смешанные производные выражения потенциальной энергии по обобщенным координатам:

$$q_{11} = \frac{\partial^2 \Pi}{\partial x_1^2}, \quad q_{22} = \frac{\partial^2 \Pi}{\partial z_1^2}, \quad \dots, \quad q_{12} = \frac{\partial^2 \Pi}{\partial x_1 \partial z_1}, \quad \dots$$

На рис.2 приведена схема предложенной конструкции, для которой получено выражение потенциальной энергии. Узел состоит из неподвижного корпуса *a*, в котором на опорах 1, 2 установлен промежуточный ротор *b*. В промежуточном роторе

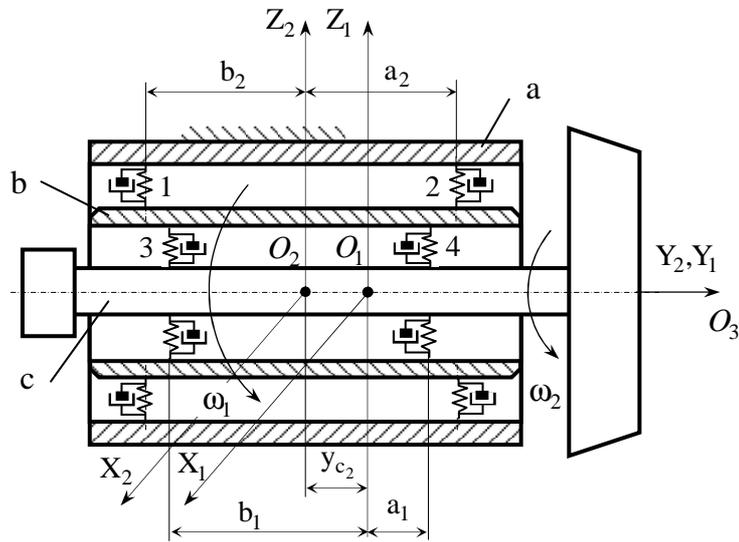


Рис.2

на опорах 3, 4 установлен основной ротор *c*. Приведены также конструктивные размеры $a_1, b_1, a_2, b_2, y_{c2}$, необходимые для отметки месторасположения опор 1 - 4 относительно центров масс основного и промежуточного роторов O_1 и O_2 . Допустим, опоры роторов являются изотропными и имеют нелинейную характеристику жесткости, выраженной зависимостью [7]

$$C_{ix} = a_{i1} + 3a_{i3}x_{(i)}^2, \quad C_{iz} = a_{i1} + 3a_{i3}z_{(i)}^2, \quad (2)$$

где C_{ix}, C_{iz} - жесткости опор роторов ($i=1...4$) в направлении взаимно перпендикулярных осей X_j, Z_j ($j=1...2$); a_{i1}, a_{i3} - постоянные, зависящие от конструктивных параметров опор; $X_{(1)}, Z_{(1)}$ и $X_{(2)}, Z_{(2)}$ - координаты перемещения точек оси промежуточного ротора, лежащие в сечении, проходящем через эти опоры; $X_{(3)}, Z_{(3)}$ и $X_{(4)}, Z_{(4)}$ - координаты относительного перемещения точек осей основного и промежуточного роторов, лежащие в сечении, проходящем через опоры основного ротора.

Потенциальная энергия системы будет складываться из потенциальной энергии деформированных опор роторов 1..4, так как роторы в этой задаче принимаются жесткими, исходя из реальных размеров эксплуатируемых роторов. На основе вышесказанного и с учетом (2) потенциальная энергия системы определяется выражением

$$\Pi = \sum_{i=1}^4 \left[\frac{1}{2} a_{i1} (x_{(i)}^2 + z_{(i)}^2) + \frac{1}{4} a_{i3} (x_{(i)}^4 + z_{(i)}^4) \right]. \quad (3)$$

Последовательно вычисляя вторые частные производные, для выражения (3) по координатам $X_{(i)}$ и $Z_{(i)}$ получим

$$\frac{\partial^2 \Pi}{\partial x_{(i)}^2} = k_i(x_i) = a_{i1} + a_{i3}x_{(i)}^2, \quad \frac{\partial^2 \Pi}{\partial z_{(i)}^2} = k_i(z_i) = a_{i1} + a_{i3}z_{(i)}^2. \quad (4)$$

Все смешанные производные выражения потенциальной энергии по обобщенным координатам будут равны нулю. Следовательно, учитывая условие (1), получим диагональную матрицу размерностью 8×8 . Из этой матрицы, последовательно вычисляя определители размерностью 1×1 , 2×2 , 3×3 , ... , 8×8 , с учетом (1) и (4) получим восемь условий устойчивости положения равновесия системы, которые все выполняются, если множители выражения (5) положительные:

$$\prod_{i=1}^4 (a_{i1} + 3a_{i3}x_{(i)}^2) \cdot \prod_{i=1}^4 (a_{i1} + 3a_{i3}z_{(i)}^2) > 0. \quad (5)$$

После анализа выражения (4) нетрудно заметить, что оно выполняется, если его множители положительные. Следовательно, условие устойчивости положения равновесия рассмотренной системы можно записать в существенно упрощенной форме:

$$a_{i1} + a_{i3}x_{(i)}^2 > 0, \quad (6)$$

$$a_{i1} + a_{i3}z_{(i)}^2 > 0. \quad (7)$$

Ввиду симметричности неравенств в системе (6) и (7) достаточно анализировать условия выполнения только одного неравенства. Все полученные при этом выводы в плоскости XOY можно отнести и к плоскости YOZ . Заметим, что левые части неравенств в системе (6) и (7) совпадают с выражением (2) для определения жесткости нелинейной опоры. Следовательно, задача устойчивости положения равновесия системы с нелинейными опорами сводится к обоснованному выбору характеристик жесткости этих опор. Для начала проанализируем выражение (6) (рис.3). Здесь необходимо рассмотреть четыре возможные области значений коэффициентов a_{i1} и a_{i3} , имея в виду, что жесткость опоры не может быть отрицательной.

1. $a_{i1} = 0$ и $a_{i3} > 0$ - при нулевом перемещении оси опоры ее жесткость нулевая. В этом случае положение равновесия системы всегда устойчиво, кроме положения, когда перемещение оси опоры равно нулю (рис.3, кривая 1).
2. $a_{i1} > 0$ и $a_{i3} > 0$ - опоры имеют предварительную жесткость, то есть конечную жесткость опоры при нулевом перемещении. С последующим возрастанием перемещения жесткость увеличивается. В этом случае положение системы всегда устойчиво, независимо от величины перемещения оси опоры от исходного положения (рис.3, кривая 2).

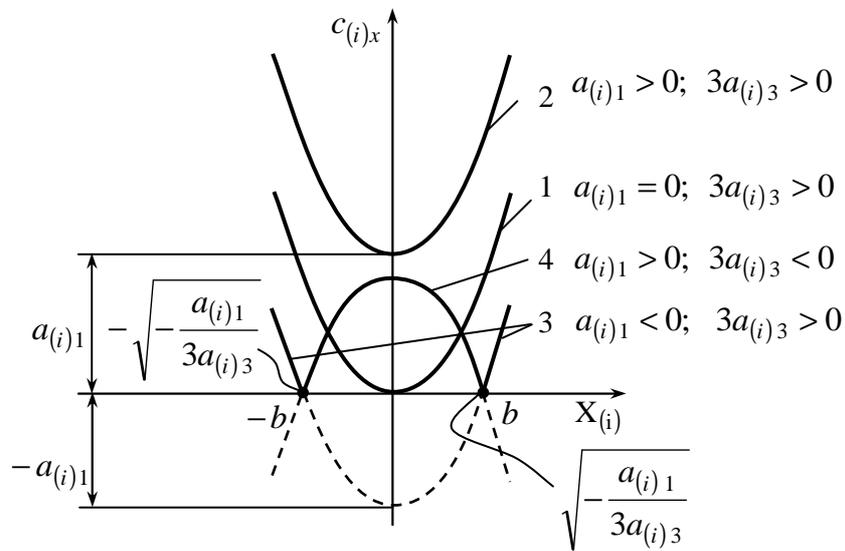


Рис. 3

$a_{i1} < 0$ и $a_{i3} > 0$ - опоры имеют возрастающую жесткость в зависимости от величины перемещения оси ротора лишь в случае, если перемещение превышает определенное значение: $|x_i| > \pm\sqrt{-a_{i1}/3a_{i3}}$ (рис.3, кривая 3). Если же значение перемещения оси ротора находится в пределах $(-b, b)$, жесткость опоры не меняется и равняется нулю. Это может произойти в случае, если, например, ротор в опоре установлен с зазором. Такая система может обладать устойчивостью положения равновесия только при определенной частоте вращения ротора, когда амплитуда его колебаний превышает зазор в опоре. Однако система должна проходить через полосу неустойчивости при разгоне роторов до необходимой частоты вращения.

3. $a_{i1} > 0$ и $a_{i3} < 0$ - опоры имеют убывающую характеристику жесткости в зависимости от величины перемещения оси ротора, если перемещение не превышает определенное значение: $|x_i| > \pm\sqrt{-a_{i1}/3a_{i3}}$ (рис.3, кривая 4). При перемещении оси ротора в пределах $(-b, b)$ система обладает устойчивостью, но если амплитуда колебаний оси ротора превышает значение b , система теряет устойчивость положения равновесия.

Таким образом, для проектирования опор роторов можно рекомендовать характеристику изменения жесткости соответствующей кривой 1 (рис.3). Заметим, что в общем случае перемещение x_i связано с конструктивными размерами роторов и координатами расположения их опор $y_{c_2}, a_1, b_1, a_2, b_2$ (рис.2). Однако, если жесткость опоры выбрана по кривой 1 (рис.3), условие устойчивости положения равновесия выполняется при любых значениях конструктивных размеров. Следовательно, нелинейность опор роторов позволяет, при определенной характеристике жесткости, обеспечить устойчивость положения равновесия соосной двухроторной системы при любой компоновке узла. Ранее нами было показано, как

при линейных опорах конструктивные размеры расположения опор роторов и центров их масс влияют на устойчивость положения равновесия системы [8].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Новая конструкция опоры прядильной камеры пневмопрядильной машины: Информационный листок № 881-79 / Ленинградский межотраслевой территориальный центр научно-технической информации и пропаганды.-1979.
2. **Кельзон А.С.** и др. Динамика роторов в упругих опорах. – М.: Наука, 1982.-280 с.
3. А.с. № 832, А2. Республика Армения, МКИ D01H7/10. Опорный узел веретена прядильной камеры / **Папоян А.Р.** - № 99075; Заявлено 30.07.99г. Оpubл. 22.06.2000г., Пром. собственность.- №2.-132 с.
4. А.с. № 1051, А2. Республика Армения, МКИ D01H7/10. Опорный узел текстильного шпинделя / **Папоян А.Р.** - № P20010030; Заявлено 27.02.2001г. Оpubл. 28.12.2001г., Пром. собственность.- №2.- 48 с.
5. **Папоян А.Р.** Анализ динамических характеристик прядильных камер с двумя соосными роторами // Вестник Санкт-Петербургского государственного ун-та технологии и дизайна. –2001.- № 2.- 178 с.
6. **Пановко Я.Г.** Введение в теорию механических колебаний.- М.: Наука, Глав.ред. физмат. лит., 1980. –272 с.
7. **Митропольский Ю.А.** Проблемы асимптотической теории нестационарных колебаний.- М.: Наука, 1964.- 431 с.
8. **Папоян А.Р.** К выбору оптимальных параметров опор соосной двухроторной системы //Моделирование, оптимизация, управление: – Сб. научн. тр.-Ереван.- 2002.– Вып.5.- с. 153-156.

Гюмрийский образовательный комплекс ГИУА. Материал поступил в редакцию 04.09.2002.

Ա.Ռ. ՊԱՊՈՅԱՆ

**ՀԱՄԱՌԱՆՑՔ ՌՈՏՈՐՆԵՐԸ ՏԵՔՍՏԻԼ ՄԵՔԵՆԱՆԵՐԻ ԱՐԱԳԸՆԹԱՑ
ԱՇԽԱՏԱՆՔԱՅԻՆ ՕՐԳԱՆՆԵՐՈՒՄ ԵՎ ԴՐԱՆՑ ՀԱՎԱՍԱՐԱԿՇՈՒԹՅԱՆ
ԴԻՐՔԻ ԿԱՅՈՒՆՈՒԹՅՈՒՆԸ**

Առաջարկվում են մեծ արագությամբ պտտվող տեքստիլ իլիկների նոր կառուցվածքներ, որոնց հիմքում ընկած է երկու համառանցք ռոտորների օգտագործման գաղափարը: Վերլուծվում են առաջարկվող կառուցվածքների հատկությունները: Տեսականորեն ուսումնասիրված է համառանցք երկռոտորային համակարգի հավասարակշռության դիրքի կայունության խնդիրն այն դեպքի համար, երբ ռոտորների հենարաններն ունեն կոշտության ոչ գծային բնութագրեր՝ արտահայտված երկրորդ կարգի պարաբոլական կախվածությամբ: Ձևակերպված են հենարանների կոշտության բնութագրերի ընտրության առաջարկություններ:

A.R. PAPOYAN

**COAXIAL ROTORS IN HIGH – SPEED WORKING ORGANS OF TEXTILE
MACHINES AND THEIR EQUILIBRIUM POSITION STABILITY**

New constructions of textile high- speed spindles using the idea of a twin rotor coaxial system are proposed and constructive properties of suggested nodes are analyzed. The equilibrium position stability of the coaxial double rotor system is theoretically studied, while the rotor bearings have nonlinear rigidity characteristics in the form of second-degree parabolic dependence. Recommendations on optimal parameter choice of nonlinear bearing rigidity characteristics are developed.

Ա.Կ. ՊՈՂՈՍՅԱՆ, Ա.Օ. ԲԱԽՇՅԱՆ, Ա.Ա. ԹԱՄՐԱԶՈՎ

**ԱՎՏՈՏՐԱՆՍՊՈՐՏԱՅԻՆ ՄԻՋՈՑՆԵՐԻ
ՄԿԱՎԱՌԱԿԱԿՈՃՂԱԿԱՎՈՐ ԱՐԳԵԼԱԿՆԵՐԻ
ԹՐԹՈՒԱԿԱՅՈՒՆՈՒԹՅԱՆ ՀԱՇՎԱՐԿԸ**

Կատարված է ավտոտրանսպորտային միջոցների արգելակային սարքի թրթռակայունության հաշվարկ: Դիտարկված է արգելակային շփագույգի տատանողական պրոցեսը՝ շփամակերևույթի ալիքայնության պարամետրերից կախված: Բացահայտված է մակերևույթային ալիքայնության ազդեցությունը շփատատանումների առաջացման վրա: Հաշվարկային մեթոդիկան կիրառված է առավել տարածված՝ սկավառակակոճղակավոր արգելակների վրա:

Առանցքային բառեր. սկավառակակոճղակավոր արգելակ, թրթռակայունություն, շփագույգ, շփատատանումներ, մակերևույթային ալիքայնություն:

Ավտոտրանսպորտային միջոցների շահագործման հուսալիությունն ու անվտանգությունն ապահովող առավել պատասխանատու սարքերից են արգելակային հանգույցները, որոնց նշանակությունն առավել աճում է տեղափոխման արագության, բեռնատարողության և արգելակումների հաճախության աճի հետ: Արգելակային սարքերի հուսալիության և երկարակեցության բարձրացման հիմքում ընկած է թրթռակայունության ապահովումը:

Մի շարք էական առավելությունների (արգելակային մոմենտի համեմատաբար մեծ արժեքներ, ջերմահեռացման բավարար պայմաններ, փոքր գաբարիտային չափսեր և այլն) շնորհիվ ներկայումս լայն տարածում են գտել և առավել հեռանկարային են համարվում սկավառակակոճղակավոր արգելակային սարքերը: Հայտնի է, որ արգելակման ընթացքում սկավառակակոճղակավոր արգելակի սկավառակի և կոճղակի փոխազդեցության հետևանքով վերջինս կատարում է փոքր առաձգական տեղափոխություններ: Արգելակման պահին առաջացող ռելաքսացիոն տատանումները («stic-slip») խոչընդոտում են արգելակային սարքի հուսալի աշխատանքին: Դա արտահայտվում է ցնցումների տեսքով, հատկապես արգելակման վերջնական պահին, երբ շարժման արագությունը փոքր է: Արգելակներում առաջացող շփատատանումների հաճախությունը կարող է հասնել 8000 Հց-ի, ինչը նաև շրջակա եթեր առաքվող աղմուկի («ծվոց») պատճառն է:

Արգելակային շփագույգի թրթռակայունությունը բնութագրող բազմաթիվ գործոնների (արագություն, ջերմաստիճան, ճնշում և այլն) թվին են պատկանում նաև սկավառակի մակերևույթային միկրոերկրաչափական պարամետրերը: Թրթռատատանումների առաջացման վրա մեծ ազդեցություն ունի շփման մակերևույթի ալիքայնությունը, և այդ ազդեցությունը միանշանակ չէ:

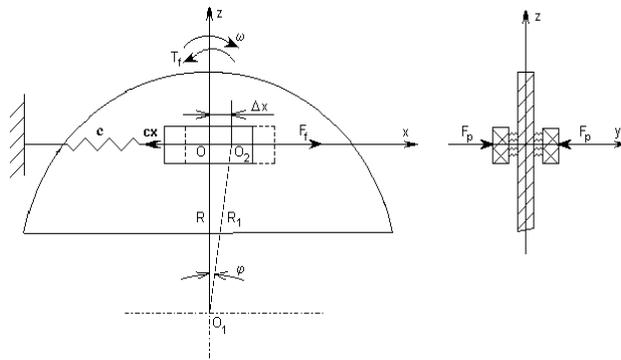
Սկավառակակոճղակավոր արգելակի թրթռակայունության հաշվարկման համար առաջարկվող մեթոդիկան իրականացված է նկ.1-ում պատկերված մոդելի հիման վրա, որն առավել ճշգրտությամբ է արտացոլում արգելակային կոճղակի

տատանողական պրոցեսը՝ հաշվի առնելով նաև սկավառակի անհավասարաչափ պտույտը [1]:

Կոճղակի շփման մակերևույթին տարված շոշափողի ուղղությամբ տատանողական պրոցեսը՝ նկարագրվում է հետևյալ դիֆերենցիալ հավասարումների համակարգով՝

$$\begin{cases} I\ddot{\phi} = -T_f, \\ m\ddot{x} = -cx + F_f, \end{cases} \quad (1)$$

որտեղ T_f -ը և F_f -ն արգելակման մոմենտը և շփման ուժն են շփահպակում, cx -ն՝ իրանի հետ կոճղակի առաձգական կապի ուժը, \ddot{x} -ը և $\ddot{\phi}$ -ը՝ կոճղակի և արգելակային սկավառակի անկյունային արագացումները:



Նկ.1. Սկավառակակոճղակավոր արգելակի տատանողական պրոցեսի հաշվարկային մոդելը

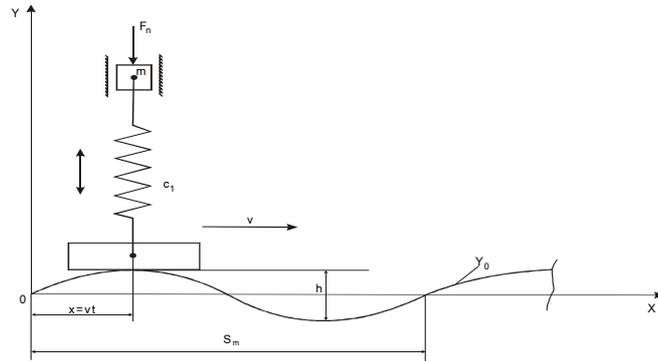
Ընդունելով, որ սկավառակի մակերևույթի ալիքայնությունն ունի սինուսոիդին մոտ տեսք (նկ.2), մակերևույթի պրոֆիլը կարելի է ներկայացնել հետևյալ արտահայտությամբ [2].

$$Y_0 = \frac{h}{2} \sin \frac{\pi vt}{S_m}, \quad (2)$$

որտեղ h -ն ալիքի բարձրությունն է, S_m -ն՝ ալիքի քայլը, V -ն՝ սահքի հարաբերական արագությունը: Սկավառակի կողմից կոճղակի վրա ազդող ուժը՝

$$P = \frac{c_1 h}{2} \sin \frac{\pi vt}{S_m}, \quad (3)$$

որտեղ c_1 -ը կոճղակի կոշտությունն է ուղղահայաց ուղղությամբ:



Նկ.2. Կոճղակի շփման հարթությանն ուղղահայաց տատանումների հաշվարկային սխեման

Կոճղակի շփամակերևութին ուղղահայաց ուղղությամբ հարաբերական շարժման հավասարումը կունենա հետևյալ տեսքը [2].

$$m\ddot{y} = -c_1 y + \frac{h}{2} \sin\left(\frac{\pi vt}{S_m}\right) - F_n, \quad (4)$$

որտեղ F_n - ը կոճղակին սեղմող ուժն է:

Դիֆերենցիալ հավասարումների (1) համակարգում շփման գործակցի ֆունկցիոնալ կախումն արագությունից ընդունված է [1] փորձնական տվյալների հիման վրա ստացված հետևյալ պոլինոմի տեսքով.

$$f = b_0 + b_1 v + b_2 v^2 + b_3 v^3 : \quad (5)$$

Հաշվի առնելով, որ հսկան գոտում շփման իրական գծային արագությունը կարելի է ներկայացնել որպես սկավառակի և կոճղակի գծային արագությունների տարբերություն՝ $V = R\dot{\phi} - \dot{x}$, (5) հավասարումը կընդունի հետևյալ տեսքը.

$$f = b_0 + b_1 (|R\dot{\phi} - \dot{x}|) + b_2 (|R\dot{\phi} - \dot{x}|)^2 + b_3 (|R\dot{\phi} - \dot{x}|)^3, \quad (6)$$

որտեղ R -ը արգելակային սկավառակի և կոճղակի շփման գոտու միջին շառավիղն է, $(R\dot{\phi} - \dot{x})$ -ը՝ հարաբերական սահքի արագությունը, որի համար առանձին պահերին հնարավոր է ինչպես $R\dot{\phi} \geq \dot{x}$, այնպես էլ $R\dot{\phi} < \dot{x}$ հարաբերակցությունը: Վերջին դեպքում շփման ուժը փոխում է իր ուղղությունը, այդ պատճառով (1) դիֆերենցիալ հավասարումների համակարգում նպատակահարմար է մտցնել նշանները որոշող $\text{sign}(R\dot{\phi} - \dot{x})$ ֆունկցիա:

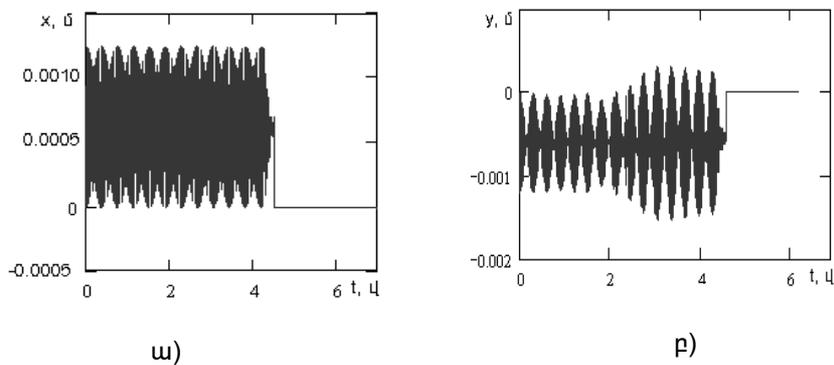
Արգելակային կոճղակի տատանողական պրոցեսի վրա սկավառակի մակերևութային ալիքայնության ազդեցությունը հաշվի առնելու նպատակով (4) հավասարումը համադրվում է սկավառակակոճղակավոր արգելակի տատանողական պրոցեսը նկարագրող մոդելի հավասարումների (1) համակարգի հետ: Հաշվի առնելով շփման ուժի $F_f = F_n f$ արժեքը և $f = \Psi(v)$ ֆունկցիոնալ

կախման ընդհատուն բնույթը՝ հավասարումների համակարգն ի վերջո ընդունում է հետևյալ տեսքը.

$$\left\{ \begin{array}{l} \ddot{\phi} = -R \frac{F_n}{I} f \cdot \text{sign}(R\dot{\phi} - \dot{x}) \\ \ddot{x} = -\frac{c}{m} x + \frac{F_n}{m} f \cdot \text{sign}(R\dot{\phi} - \dot{x}) \\ \ddot{y} = -\frac{c_1}{m} y + \frac{h}{2m} c_1 \sin\left(\frac{\pi(R\dot{\phi} - \dot{x})t}{S_m}\right) - \frac{F_n}{m} : \end{array} \right. \quad (7)$$

Դիֆերենցիալ հավասարումների համակարգի լուծման համար կազմված է ալգորիթմ՝ MathCAD 2001 Pro հատուկ ծրագրային ապահովման փաթեթի միջոցով: Կատարված է ՎԱՋ մակնիշի ավտոմոբիլի սկավառակակոճղակավոր արգելակի թրթռակայունության հաշվարկ ասբեստազերծ Բաստենիտ տիպի շփանյութի [3] համար, որի արդյունքները գրաֆիկական տեսքով պատկերված են նկ.3-ում:

Արգելակման սկզբնական պահին (նկ.3 ա) գրանցվում է տատանման մեծ ամպլիտուդ, իսկ կոճղակի տատանումները կրում են ցածրահաճախային բնույթ: Երբ սկավառակի գծային արագության արժեքը մոտենում է կոճղակի տատանման արագության արժեքին, գումարվում է տատանումների համեմատաբար բարձրահաճախային բաղադրիչը: Արգելակման վերջնական պահին, երբ սկավառակի արագությունը համեմատաբար փոքր է, կոճղակի բարձրահաճախային տատանումները պահպանվում են, սակայն կտրուկ նվազում է ամպլիտուդը: Գրաֆիկների օգնությամբ կարելի է հաշվարկել կոճղակների տատանման ամպլիտուդային և հաճախային արժեքները, որոնք կարևոր նշանակություն ունեն շփագույգի թրթռակայունության համար:



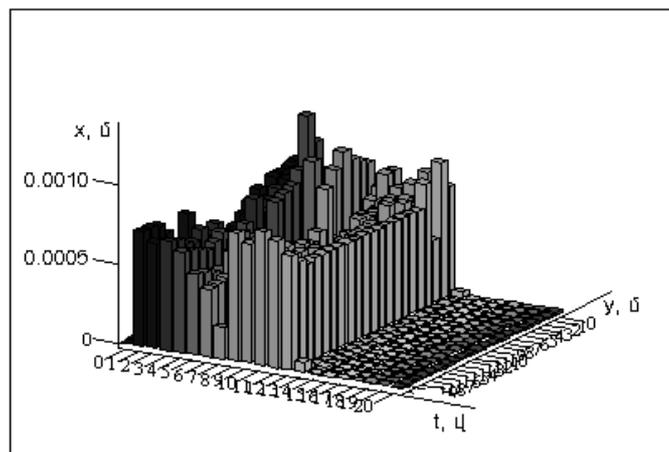
Նկ.3. Շփամակերևույթին շոշափող (ա) և նորմալ (բ) ուղղություններով կոճղակի թրթռատեղաշարժերի կախումները արգելակման ժամանակից

Արգելակային սկավառակի շփամակերևույթի նորմալի ուղղությամբ թրթռատեղաշարժերի կախումը ժամանակից պատկերված է նկ.3 բ-ում:

Արգելակման սկզբնական պահին թրթռատեղաշարժերի համեմատաբար փոքր ամպլիտուդը պայմանավորված է արգելակման սկզբնական արագության մեծ արժեքով: Իսկ արգելակման վերջնական պահին, երբ նվազում է արագությունը, զգալի է դառնում սկավառակի մակերևութային պրոֆիլի անհարթությունների (ալիքայնության) ազդեցությունը, ինչը նպաստում է տատանման ամպլիտուդի աճին:

Կոճղակի թրթռատեղաշարժի մեծությունը կարող է հասնել մինչև 1,5 մմ: Նման տեղաշարժերի պայմաններում առաջանում է հարվածային երևույթ, որը շրջակա եթեր հեռարձակվող անցանկալի աղմուկի (“ծվոց”) ճառագայթման աղբյուր է: Բացի դրանից, հարվածները բացասական ազդեցություն են թողնում կոճղակի մաշակայունության, շփման գործակցի կայունության, ինչպես նաև ամբողջ արգելակային սարքի հուսալի աշխատանքի և, ի վերջո, ավտոտրանսպորտային միջոցի սահուն կանգառի վրա:

Արգելակային սարքի տատանողական պրոցեսն ամբողջությամբ գնահատելու նպատակով կարևոր է դիտարկել շփամակերևույթի նորմալ և շոշափող ուղղություններով տատանումների փոխադարձ կապը: Նշված տատանումների փոխազդեցության գաղափարի տեսակետից մեծ հետաքրքրություն է ներկայացնում նկ.4-ում պատկերված գրաֆիկը, որն արտացոլում է նորմալ և շոշափող տատանումների փոխազդեցությունը: Տվյալ դիագրամի օգնությամբ կարելի է գնահատել արգելակման պրոցեսի առավել անբարենպաստ ընթացքները, երբ կոճղակի նորմալ և շոշափող թրթռատեղաշարժերը ձգտում են իրենց առավելագույն արժեքներին: Արգելակման սկզբնական պահին նորմալի ուղղությամբ կոճղակի թրթռատեղաշարժերի համեմատաբար փոքր արժեքին համապատասխանում են x ուղղությամբ փոքր տեղաշարժեր: Կանգառին նախորդող պահին, նորմալի ուղղությամբ տատանումների ամպլիտուդի աճի հետ



մեծանում է նաև շոշափողի ուղղությամբ թրթռատեղաշարժերի տատանման ամպլիտուդը:

Նկ.4. Արգելակային կոճղակի նորմալ և շոշափող ուղղություններով թրթռատեղաշարժերի փոխկապված կախումը ժամանակից

Հաշվարկային մեթոդիկայի արդյունքներից ակնհայտ է, որ արգելակային սկավառակի մակերևույթի ալիքայնության շնորհիվ առաջացող նորմալի ուղղությամբ տատանումներն իրենց ազդեցությունն են թողնում շոշափողի ուղղությամբ տատանումների վրա՝ կանգառին նախորդող պահին մեծացնելով դրանց ամպլիտուդը: Բացի դրանից, շփահարթության ուղղահայաց ուղղությամբ տատանումներն իրենց հերթին ցնցումների և շրջակա միջավայր ճառագայթվող աղմուկի պատճառ են հանդիսանում: Հաշվարկային մեթոդիկայի միջոցով կարելի է նոր մշակվող նյութերի համար որոշ պարամետրերի (միկրոերկրաչափական, կոճղակի ուղղահայաց ուղղությամբ կոշտության) տարակերպման միջոցով ուսումնասիրել տատանողական տարրապատկերի դինամիկան արգելակման ողջ պրոցեսի ընթացքում:

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. **Погосян А.К., Макарян В.К., Гагян Г.С.** Расчет виброустойчивости фрикционных пар дисково-колодочных тормозных устройств машин // Трение и износ.- 1992.- Т.12, N2.- С. 225-231.
2. **Пановко Я.Г.** Введение в теорию механических колебаний. -М.: Наука, 1991.- 255 с.
3. **Погосян А.К., Меликсетян Н.Г., Ламбарян Н.А.** Исследование работоспособности фрикционных материалов тормозных устройств // Трение и износ.- 1987.- Т.8, N5.- С. 785-791.

ՀՊՃՀ : Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 27.06.2002:

А.К. ПОГОСЯН, А.О. БАХШЯН, А.А. ТАМРАЗОВ

РАСЧЕТ ВИБРОУСТОЙЧИВОСТИ ДИСКОВО-КОЛОДОЧНЫХ ТОРМОЗОВ АВТОТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

Проведен расчет виброустойчивости тормозных устройств автотранспортных средств. Рассмотрен колебательный процесс фрикционной пары в зависимости от параметров волнистости поверхности трения. Показано влияние волнистости поверхности на возникновение фрикционных колебаний. Расчетная методика применяется на примере наиболее распространенных дисково-колодочных тормозов.

A.K. POGOSIAN, A.O. BAKHSHYAN, A.A. TAMRAZOV

VIBROSTABILITY CALCULATION OF DISK-PAD BRAKE VEHICLES

Vehicle brake vibrostability calculation is carried out. The oscillatory friction couple process due to the wavy surface parameters is considered. The wavy surface influence on friction vibrations rise is shown. The calculation method is applied for the example of the wide spread disc-pad brake.

Ս.Գ. ԱՂԲԱԼՅԱՆ, Ռ.Ս. ԵՂԻԱԶԱՐՅԱՆ

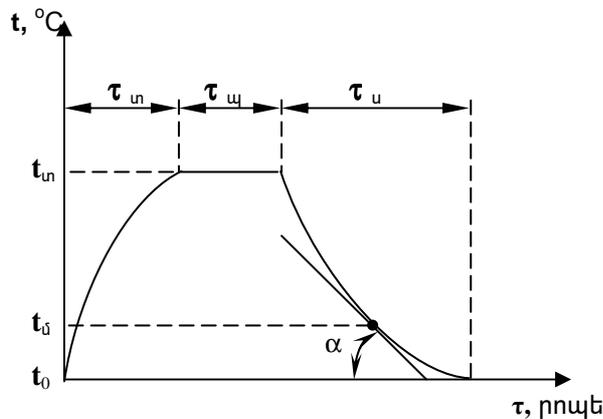
ՋԵՐՄԱՑԻԿԼԻԿ ՄՇԱԿՄԱՄԲ ՍՏԱՑՎԱԾ ԿՈՆԵԼԻ ԹՈՒՋԻ ՄԵԽԱՆԻԿԱԿԱՆ ՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԸ

Հետազոտվել են բարձրջերմաստիճանային ջերմացիկլիկ մշակումով ստացված կոելի թուջի մեխանիկական հատկությունները: Ցույց է տրվում, որ ի տարբերություն ավանդական գրաֆիտացնող թծման, ջերմացիկլիկ մշակումը լավացնում է թուջի մեխանիկական հատկությունները և, միաժամանակ, կտրուկ կրճատում ջերմային մշակման տեխնոլոգիական ժամանակը՝ տնտեսելով միջոցները:

Առանցքային բառեր. թուջ, կոելի, ջերմացիկլ, թրծում, մխում, ցեմենտիտ, գրաֆիտացում, աուստենիտ, ֆերիտ, պեռլիտ:

Հայտնի է [1], որ մետաղական նյութերի աշխատունակության բարձրացման արդյունավետ և պարզ եղանակներից մեկը ջերմային մշակումն է (նկ. 1), որը բնութագրվում է հետևյալ հիմնական տեխնոլոգիական պարամետրերով.

- տաքացման ջերմաստիճանով՝ t_m , այսինքն՝ այն առավելագույն ջերմաստիճանով, մինչև որը կարելի է տաքացնել համաձուլվածքը ջերմային մշակման ժամանակ;
- տաքացման ջերմաստիճանում պահման տևողությամբ՝ τ_m ;
- տաքացման արագությամբ՝ v_m ;
- սառեցման արագությամբ՝ v_u :



Նկ. 1. Մետաղների ջերմային մշակման սխեման

Թուջե ձուլվածքների մեխանիկական հատկությունները բարձրացնելու համար լայն տարածում է գտել այնպիսի ջերմային մշակումը, որն ուղղված է թուջում առկա ցեմենտիտի լրիվ կամ մասամբ տրոհմանը, և որի արդյունքում սպիտակ թուջից ստացվում է կոելի թուջ: Բարձր մեխանիկական հատկությունների շնորհիվ, կոելի թուջը լայն կիրառություն է գտել հարվածային և թրթիռային բեռնվածքների տակ աշխատող մեքենամասերի պատրաստման բնագավառում,

ինչպիսիք են բեռնատար մեքենաների արգելակման թմբուկները, անիվների վռանները, դիֆերենցիալի տուփը, սոնիների կախոցները, բաշխիչ և ծնկաձև լիսեռները, կցամասերը, շղթայի օղակները, դարձակները, հետին կամրջակները և այլն [2]:

Ներկայումս արտադրվում են երկու տեսակի կռելի թուջեր. ֆերիտային հիմքով, որը ստացվում է գրաֆիտացնող թրծման արդյունքում և ունի ֆերիտա-գրաֆիտային կառուցվածք և ածխածնազրկված պեռլիտա-գրաֆիտային հիմքով, որը ստացվում է դետալի կենտրոնական մասի մասնակի գրաֆիտացման և մակերևութային շերտի ածխածնազրկման միջոցով:

Ֆերիտային հիմքով կռելի թուջ ստանալու համար սպիտակ թուջե ձուլվածքները ենթարկվում են թրծման չեզոք միջավայրում՝ $850...950^{\circ}C$, իսկ պեռլիտային հիմքով թուջի ստացման միջավայրը, որտեղ տեղի է ունենում մակերևութային շերտի ածխածնազրկում, պետք է լինի օքսիդացնող: Այսպիսի ջերմամշակման արդյունքում միջուկում աուստենիտը փոխակերպվում է պեռլիտի:

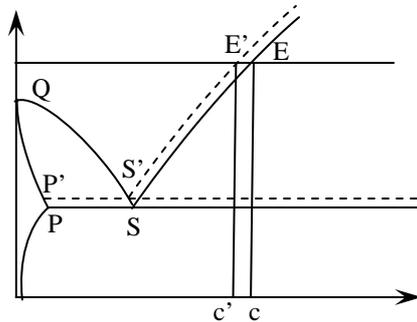
Սպիտակ թուջի գրաֆիտացումը տեղի է ունենում երկու փուլով: Առաջին փուլն ավարտվում է ազատ ցեմենտիտի տրոհմամբ, որի արդյունքում ստացվում է երկֆազ համակարգ՝ բաղկացած աուստենիտից և գրաֆիտից՝ թրծման ածխածնի կուտակումների ձևով:

Գրաֆիտացման երկրորդ փուլում պեռլիտի կառուցվածքում եղած ցեմենտիտը տրոհվում է մինչև գրաֆիտ: Երկրորդ փուլում գրաֆիտացման ընթացքը պայմանավորված է փոխակերպության ջերմաստիճանն անցնելու արագությամբ: Արագ անցման դեպքում ածխածինը հանդես կգա ցեմենտիտի ձևով, իսկ դանդաղ անցման ժամանակ՝ գրաֆիտի [3]:

Գրաֆիտացման կենտրոններն առաջանում են աուստենիտում ածխածնի կոնցենտրացիոն ֆլուկտուացիաների հետևանքով: Սպիտակ թուջի բյուրեղացման ժամանակ միշտ առաջանում է որոշ (ճիշտ է, փոքր) քանակությամբ գրաֆիտ՝ մանր ներխառնուկների տեսքով: Այս ներխառնուկները ևս հետագա ջերմային մշակման ժամանակ դառնում են գրաֆիտացման սաղմեր:

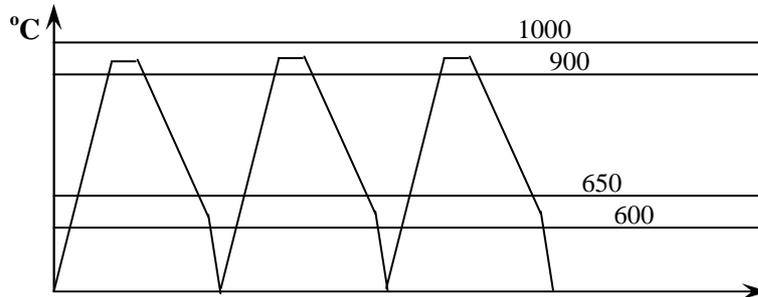
Ցեմենտիտի տրոհման ժամանակ գրաֆիտացման շարժիչ ուժը ազատ էներգիայի նվազումն է: Ինչպես երևում է Fe-C վիճակի դիագրամից (նկ. 2), թրծման ժամանակ թեև իրական թուջում c-ի և c'-ի միջև տարբերությունը չի գերազանցում 0,1% ածխածինը, այնուամենայնիվ պինդ լուծույթում՝ աուստենիտում, նման անհամասեռ բաշխվածքն առաջ է բերում դիֆուզիա և ածխածնի ատոմների տեղափոխություն բարձր կոնցենտրացիայով (c) տիրույթից դեպի ցածր կոնցենտրացիայով (c') տիրույթը, որը և փոխում է ցեմենտիտի և գրաֆիտի հավասարակշռությունը: Որպեսզի լրացվի ածխածնի կոնցենտրացիան աուստենիտում մինչև c%, ցեմենտիտը պետք է լուծվի, իսկ գրաֆիտ-աուստենիտ սահմանում պետք է անջատվի ածխածին՝ իջեցնելով նրա պարունակությունը մինչև c' %: Գրաֆիտային ներխառնուկները նման ձևով աճում են, իսկ ցեմենտիտի ներխառնուկները՝ քայքայվում [4]:

Հաշվի առնելով այն հանգամանքը, որ վերը նշված տեխնոլոգիաներով կռելի թուջի ստացման գործընթացը խիստ երկարատև է, նոր տեխնոլոգիայի մշակումը, որը հնարավորություն կտա ավելի կարճ ժամանակահատվածում ստանալու բարձր մեխանիկական հատկություններով օժտված կռելի թուջեր, դառնում է խիստ հրատապ և արդիական:



Նկ. 2. Fe-C դիագրամի ձախ մասը

Աշխատանքի նպատակն է՝ ուսումնասիրել բարձրջերմաստիճանային ջերմացիկլիկ մշակմամբ (ԲՁՁՑՄ) ստացված կռելի թուջերի մեխանիկական հատկությունները և դրանց փոփոխման օրինաչափությունները: Բարձր-ջերմաստիճանային ջերմացիկլիկ մշակման (ԲՁՁՑՄ) էությունն այն է, որ սպիտակ թուջից ձուլվածքները բազմակի անգամ արագ տաքացվում են մինչև 900...1000°C, պահվում են 1,0...1,5 րոպ/մմ տևողությամբ, որից հետո սառեցվում են մինչև 600...650°C և ապա արագ միսվում ջրում կամ յուղում [նկ. 3]: Այնուհետև անմիջապես կատարվում է իզոթերմիկ թրծում՝ 10...15 ժամ ընդհանուր տևողությամբ:



Նկ. 3. Բարձրջերմաստիճանային ջերմացիկլիկ մշակման սխեման

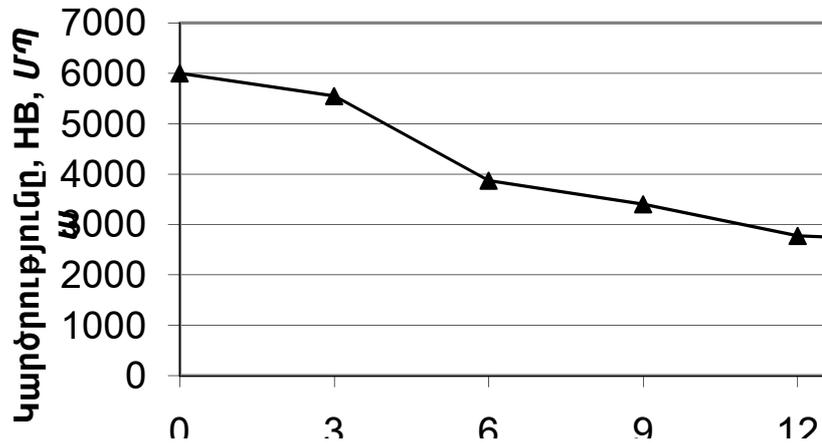
Փորձերի արդյունքների հիման վրա պարզվել է, որ ԲՁՁՑՄ-ի ժամանակ ջերմացիկլերի քանակն ավելացնելով, թուջի կարծրությունը կտրուկ ընկնում է (նկ. 4), ինչն ինտենսիվ գրաֆիտացման արդյունք է:

ԲՁՁՑՄ-ից և գրաֆիտացնող թրծումից հետո կռելի թուջի մեխանիկական հատկությունները, կախված ստացման եղանակներից, փոխվում են հետևյալ կերպ (տես աղյուսակը):

Աղյուսակ

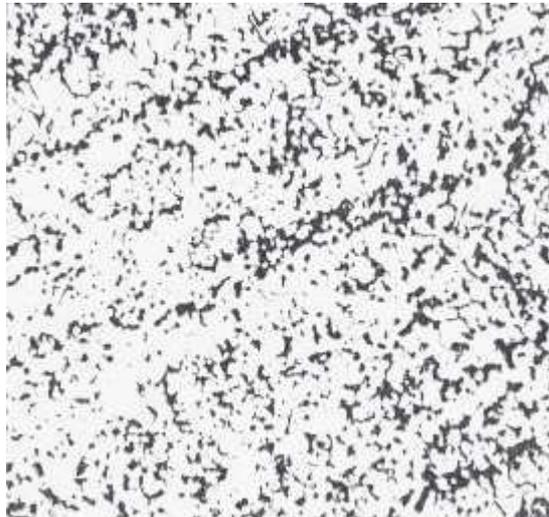
Մշակման եղանակը	$\sigma_B, \text{ՄՆ/մ}^2$	$\sigma_T, \text{ՄՆ/մ}^2$	$\delta, \%$	ԿԸ, $\Omega/\text{սմ}^2$
Գրաֆիտացնող թրծում (900°C, 4ժ)	522	489	0.3	18
Գրաֆիտացնող ԲՁՁՑՄ	835	650	3.2	27

Փորձերի արդյունքներից երևում է, որ ավանդական գրաֆիտացնող թրծման փոխարեն ԲՁՁՑՄ-ի կիրառումը բարձրացնում է թուջի մեխանիկական հատկությունները: Միաժամանակ հնարավորություն է ստեղծվում արտադրության պայմաններում կտրուկ կրճատել ջերմային մշակման տեխնոլոգիական ժամանակը:



Նկ. 4. Սպիտակ թուջի կարծրության կախվածությունը ջերմացիկների քանակից

ԲՁՁՑՄ-ի և հետագա իզոթերմիկ թրծման ժամանակ տեղի են ունենում հետևյալ ստրուկտուր փոփոխությունները՝ ստրուկտուրայի էլակետային վիճակը լեդերուրիտային է, իսկ վերջնական ստրուկտուրան՝ մանր հատիկա-թիթեղային պեռլիտ և փաթիլաձև գրաֆիտ (նկ. 5):



Նկ. 5. ԲՁՁՑՄ-ով ստացված կռելի թուջի ստրուկտուրան

Եթե սպիտակ թուջում բավականին դժվար են առաջանում գրաֆիտացման կենտրոններ, ինչը կախված է քիմիական բաղադրությունից, ապա գրաֆիտացնող ԲՋՋՄ-ի ժամանակ, որը եռակի կամ քառակի տաքացում է մինչև 900...1000°C և սառեցում օդում մինչև սենյակային ջերմաստիճան, գրաֆիտացումը կատարվում է շատ արագ, ընդ որում՝ գրաֆիտացման կենտրոններն ավելի շատ են և հավասարապես բաշխված են ամբողջ ստրուկտուրայում: ԲՋՋՄ-ով ստացված կռելի թուջերն ավելի ջերմակայուն են:

Գրաֆիտացնող ԲՋՋՄ-ը տեխնիկապես հեշտ է իրականացնել, այն կարճատև է և լավ է ազդում թուջի հատկությունների վրա: Այս տեխնոլոգիայի արդյունաբերական կիրառմամբ կարելի է հասնել միջոցների տնտեսման և թուջե ձուլվածքների որակի բարձրացման:

ՕԳՏԱԳՈՐԾՎԱԾ ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅՈՒՆ

1. **Федюкин В.К.** Термоциклическая обработка сталей и чугунов.-Л.: Машгиз, 1977.-144 с.
2. **Васильев Е.А.** Отливки из ковкого чугуна.- М.: Metallurgia 1976.-238 с.
3. **Кунявский М.Н.** Термическая обработка чугуна.-М.: Машгиз, 1950.-408 с.
4. **Лившиц Б.Г.** Металлография.-М.: Metallurgia, 1971.-408 с.

ՀՊՃՀ: Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 28.04.2002:

С. Г. АГБАЛЯН, Р. С. ЕГИАЗАРЯН

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОВКОГО ЧУГУНА, ПОЛУЧЕННОГО ПРИ ТЕРМОЦИКЛИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ

Исследованы механические свойства ковкого чугуна, полученного при высокотемпературной термоциклической обработке. Показано, что по сравнению с общепринятым графитизирующим отжигом данный метод улучшает механические свойства ковкого чугуна, одновременно сокращает технологическое время отжига и приводит к экономии средств.

S. G. AGBALYAN, R. S. YEGHIAZARYAN

MECHANICAL PROPERTIES OF THE PIG IRON, OBTAINED BY THERMOCYCLIC TREATMENT

The mechanical properties of the pig iron obtained by thermocyclic treatment are investigated. It is shown that in comparison with the usual graphitization annealing this methods improve the mechanical properties of pig iron and simultaneously reduces the technological time of thermal treatment and leads to saving the means.

Э.А. НАЗАРЯН, А.Ж. ХАНДАНЯН, М.М. АРАКЕЛЯН
О ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВАХ ЛИСТОВОГО
МОЛИБДЕНА

Исследованы технологические свойства листового молибдена в условиях одноосного и сложного напряженного состояний. Показано, что зависимость интенсивности напряжений от интенсивности деформаций описывается степенной функцией. На примере глубокой вытяжки цилиндрических изделий установлено положительное влияние температурного градиента на предельную величину формоизменения.

Ключевые слова: напряженное состояние, упрочнение, вытяжка, деформация.

Листовой молибден, изготовленный методами порошковой металлургии, находит широкое применение в промышленности в качестве конструкционного материала, работающего в условиях нагрева до высоких температур. В случае надежной защиты от окисления изделия, изготовленные из листового молибдена, имеют при высокотемпературном нагреве достаточную стабильность формы и размеров и относительно высокую удельную прочность. Указанными качественными параметрами и обусловлено применение листового молибдена в кристаллографии при изготовлении контейнеров и лодочек в процессах роста монокристаллов.

Для оценки возможности изготовления контейнеров из листового молибдена методами пластических деформаций необходимо владеть информацией о его комплексных технологических свойствах при разных схемах напряженно-деформированного состояния.

В настоящей работе приведены некоторые результаты исследований технологических свойств листового молибдена марки МЧ по ТУ 48-19-472-90 и его способности к глубокой вытяжке, механические свойства которого в направлении прокатки следующие: предел прочности – 980 МПа (100 кгс/мм²), относительное удлинение – 2%. Целью экспериментов, проводившихся в лаборатории Института механики НАН РА, являлось: определение параметров деформационного упрочнения, влияние скорости деформирования на эти параметры и оценка способности листового молибдена к глубокой вытяжке как наиболее сложного технологического процесса, при котором экспериментально реализуются разные схемы напряженно-деформированного состояния. Эксперименты проведены на универсальной испытательной машине усилием 350 кН с возможностью регулирования скорости деформирования. Образцы для испытаний на одноосное растяжение вырезались в направлении прокатки из листового молибдена марки МЧ с размерами расчетной части 50х5х0,5 мм, а круглые образцы для глубокой вытяжки – диаметром от 60 мм до 74 мм. Для определения влияния термообработки на механические свойства листового молибдена были изготовлены две партии образцов, в одной из которых они подвергались рекристаллизационному отжигу при 1250⁰ С, а

в другой- отжигу с нагревом до 850° С. В обоих случаях отжиг производился при вакууме 10⁻³ мм вод. ст.

По результатам испытаний на одноосное растяжение, согласно методике [1], определялась зависимость интенсивности напряжений σ_i от интенсивности деформаций ε_i . Скорость деформирования во всех испытаниях составляла 1,5x10⁻⁵ м/с. Пропорциональное изменение $\ln \sigma_i$ от $\ln \varepsilon_i$ позволило аппроксимировать зависимость σ_i от ε_i степенной функцией (рис.1):

$$\sigma_i = c \varepsilon_i^n, \quad (1)$$

где c и n – параметры деформационного упрочнения.

$\sigma_i, МПа$



Рис. 1. Зависимости интенсивности напряжений от интенсивности деформаций. Верхняя кривая – после отжига при 850°С, нижняя кривая – после рекристаллизационного отжига при 1250°С

По экспериментально установленным величинам c и n и соотношениям $c = \sigma_B(1+\delta)n^{-n}$, $n = \ln(1+\delta)$ определены равномерное удлинение δ и предел прочности σ_B . При рекристаллизационном отжиге (1250° С) $\delta \approx 26\%$, $\sigma_B \approx 480 МПа$, при отжиге с нагревом (850° С) $\delta \approx 9\%$, $\sigma_B \approx 815 МПа$. Установлено, что с повышением скорости деформирования величина равномерного удлинения существенно уменьшается, а предел прочности растет.

Зависимость (1) позволяет проводить анализ технологических процессов пластического формоизменения заготовок из листового молибдена с учетом деформационного упрочнения при разных схемах напряженно-деформированного состояния.

Однако на основе полученных результатов не представляется возможным судить о комплексных технологических свойствах листового молибдена, так как реальные процессы формоизменения протекают в достаточно сложных и нестационарных условиях.

Эксперименты по глубокой вытяжке цилиндрических изделий проведены на специально разработанном штампе с дифференциальным нагревом матрицы и охлаждением пуансона с возможностью регулирования усилия прижима заготовки, обеспечивающего исключение образования гофр в периферийной части заготовки.

В качестве показателя способности листового молибдена к глубокой вытяжке принята величина предельной степени деформации [2], $m=D_3/d_{cp.}$, где D_3 – максимальный диаметр заготовки, не разорвавшейся при испытании; $d_{cp.}$ – средний диаметр вытянутого изделия.

Исследования показали, что предельная степень деформаций зависит как от температурно-скоростных режимов деформирования, так и от условий трения и усилия прижима. Установлено, что при прочих одинаковых условиях предельная степень деформаций существенно увеличивается при обеспечении определенного градиента температур деформирующих инструментов около 300°C на внешнем контуре заготовки и 15°C – на пуансоне. На рис. 2 представлены графики зависимости предельной степени деформации от температуры деформирования.

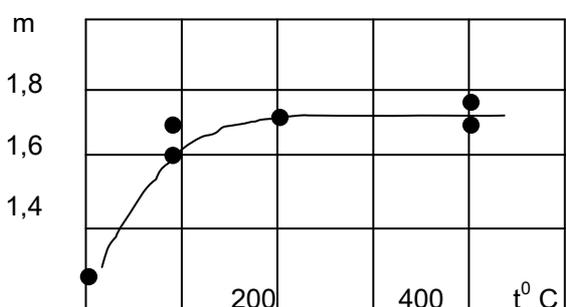


Рис.2. Зависимость предельной степени деформации от температуры

Указанное увеличение предельной степени деформации при дифференциальном нагреве объясняется тем, что при сохранении достаточной прочности опасного сечения у радиусной кромки пуансона снижается сопротивление деформированию плоской части заготовки вследствие уменьшения отношения σ_{02} / σ_b в периферийной части заготовки [3].

Листовой молибден обладает плоскостной анизотропией механических свойств, которая является следствием образования текстуры при прокатке. При глубокой вытяжке на краю вытянутых изделий образуются четыре выступа и впадины (фестонообразование), высота которых зависит от степени деформаций (рис.3).

Выступы на краю изделий образуются в направлении наименьшего сопротивления деформированию при наибольших относительных удлинениях и располагаются под углом 45° к направлению прокатки. Разрушение заготовки наблюдается в направлениях образования впадин. Объясняется это тем, что при глубокой вытяжке анизотропного материала нарушается осевая симметрия, и участки заготовки, получающие большее радиальное удлинение, тянут за собой смежные участки, имеющие более низкие показатели деформируемости, что приводит к увеличению в них растягивающих напряжений и, как следствие, к повышению опасности разрушения заготовки [2].

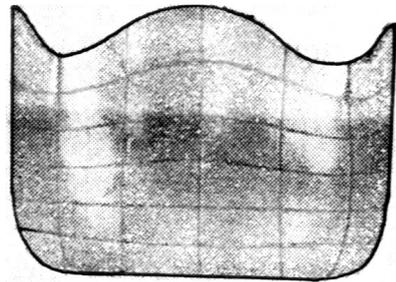


Рис. 3. Образование выступов и впадин при глубокой вытяжке листового молибдена

Таким образом, при глубокой вытяжке листового молибдена допустимое формоизменение обусловлено технологическими свойствами материала в направлениях образования впадин (0° и 90° к направлению прокатки).

Выводы

1. Оценка пригодности листового молибдена марки МЧ к технологическому процессу глубокой вытяжки по результатам испытания плоских образцов на одноосное растяжение затруднительна ввиду различия поведения молибдена в разных схемах напряженно-деформированного состояния и температурно-скоростных режимов деформирования.
2. Установлено, что для увеличения допустимых степеней деформаций и стабилизации качества вытянутых изделий целесообразно применение дифференциального нагрева.
3. Испытания листового молибдена применительно к процессу вытяжки изделий типа контейнеров и лодочек целесообразно проводить методом вытяжки цилиндрических изделий. При этом термомеханические и технологические условия испытания должны быть, по возможности, приближены к производственным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Смирнов-Аляев Г.А.** Сопротивление материалов пластическому деформированию. - Л.:Машиностроение, 1978. - 35 с.
2. **Попов Е.А.** Основы теории листовой штамповки.-М.: Машиностроение,1977. - 277с.
3. **Назарян Э.А.** Кинематика деформирования в формоизменяющих операциях листовой штамповки // Вестник машиностроения. -1999.- N2.-С. 35.

Академия проблем качества РА. Материал поступил в редакцию 20.12.2001.

Է.Ա. ՆԱԶԱՐՅԱՆ, Ա.Ժ. ԽԱՆԴԱՆՅԱՆ, Մ.Մ. ԱՌԱՔԵԼՅԱՆ

**ԹԵՐԹԱՅԻՆ ՄՈՆՈԱՅԻՆ ԵՆ ԿՈՄՊՈՅԻՆԻ ՏԵԽՆՈԼՈԳԻԱԿԱՆ
ՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՄԱՍԻՆ**

Հետազոտված են թերթային մոլիբդենի տեխնոլոգիական հատկությունները միառանցք և բարդ լարվածային վիճակներում: Ցույց է տրված, որ լարումների և դեֆորմացիաների ինտենսիվությունների կապը նկարագրվում է աստիճանային ֆունկցիայով: Գլանային դետալների արտաձգման օրինակի վրա հաստատված է ջերմային գրադիենտի դրական ազդեցությունը սահմանային ձևափոխման մեծության վրա:

E.A. NAZARYAN, A.G. KHANDANYAN, M.M.ARAKELYAN

**ON TECHNOLOGICAL CHARACTERISTICS OF SHEET
MOLIBDENIUM**

In monoaxial and compound strained conditions the technological characteristics of sheet molybdenum are investigated. It is shown that the dependence of strain and deformation intensities is described by the power function. On the example of deep drawing of cylindrical parts. The positive influence of temperature gradient on the limiting value of deformation is determined.

А.С. ПЕТРОСЯН

**МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТИТАНА И ЕГО СПЛАВОВ,
ПОЛУЧЕННЫХ ПОРОШКОВОЙ МЕТАЛЛУРГИЕЙ**

Приводятся результаты экспериментальных исследований механических свойств титана и его сплавов, полученных горячим прессованием и экструзией. Дается их оценка по сравнению с аналогичными базовыми материалами.

Ключевые слова: горячее прессование, экструзия, армированный титан, механические свойства, структурный анализ.

В [1, 2] изложены основные положения и результаты экспериментов по горячей экструзии металлокерамических материалов. В этой связи определенный интерес представляют исследования механических свойств титана и его сплавов, полученных различными способами (см. табл.).

Полиморфизм титана ($\alpha \Leftrightarrow \beta$ при 882,5(С)) и его способность образования твердых растворов и интерметаллидных соединений позволяют получать сплавы с различной структурой и свойствами. Алюминий является основным легирующим элементом для титана, относящимся к группе (-стабилизаторов, т.е. повышающим температуру полиморфного $\alpha \Leftrightarrow \beta$ - превращения, а следовательно, расширяющим область существования (-фазы.

На рис. 1 приведена часть диаграммы состояния $\langle Ti-Al \rangle$ сплавов, из которой видно, что Al повышает температуру аллотропического превращения Ti и образует обширную область твердых растворов с $\alpha-Ti$, которая простирается до 6,0% Al . Сплавы, содержащие 6,0... 12,0% Al , располагаются в двухфазной области ($\alpha + \alpha_2$), где α_2 – сверхструктура (Ti_3Al). На рис. 2 показано влияние Al на свойства Ti . Как видно, с увеличением содержания Al прочность (σ_b) сплава возрастает, пластичность (δ , KC) падает. Заметное снижение пластических свойств наблюдается для сплавов с 6,0... 8,0% Al , сплавы же с 10,0% Al хрупко разрушаются. Это вызвано образованием α_2 -фазы. В [3] установлено, что в $\langle Ti-Al \rangle$ сплавах α_2 -фаза начинает выпадать при $\sim 5,0 Al$.

Вместе с тем известно [4, 5], что ванадий препятствует образованию α_2 -фазы, поэтому в $\langle Ti-Al-V \rangle$ сплавах можно повысить содержание Al без опасения охрупчивания. Так, в $\langle Ti-Al-V \rangle$ сплавах, содержащих до 3,0% V , α_2 -фаза практически отсутствует, в сплавах с 4,0% и 6,0... 10,0% V количество α_2 -фазы составляет $\sim 7,0\%$ и $\sim 14,0... 18,0\%$. Как видно, оптимально реализуются прочность и пластичность, поэтому их относят к весьма перспективным титановым сплавам.

Таблица

Механические свойства титана и его сплавов, полученных различными способами

Состав	НВ, МПа	σ_B , МПа	δ , %	ψ , %	КС, кДж/м ²
1. Пирометаллургией (стандартные)					
BT1-1	1200... 1400	450... 550	≥ 25	≥ 50	650
<Ti-4%Al>	2500	650	13	31	530
<Ti-6%Al-4%V>	3100	930	17	38	500
2. Порошковой металлургией (горячее прессование, ~ 1150... 1200° С)					
Ti	1150	401	18	41	450
<Ti-4%Al>	2010	580	8	25	360
<Ti-6%Al-4%V>	2710	815	9	14	310
3. Порошковой металлургией (горячая экструзия, ~ 1150... 1200 ° С, $\lambda=4$)					
Ti	1420	550	35	55	670
<Ti-4%Al>	2580	690	14	36	560
<Ti-6%Al-4%V>	3160	950	15	35	520
<Ti-W*> (W*=12,5%объ.)	1850	715	26	30	870
<Ti-W*> (W*=25,0%объ.)	2140	910	17	24	1140

Примечание: 1) фракции титановых порошков – 200 мкм, <Ti-Al> и <Ti-Al-V>- порошки легированные опытно-промышленного производства;

2) W* - волокна вольфрама; d=0,06 мм, $l/d \cong 80$

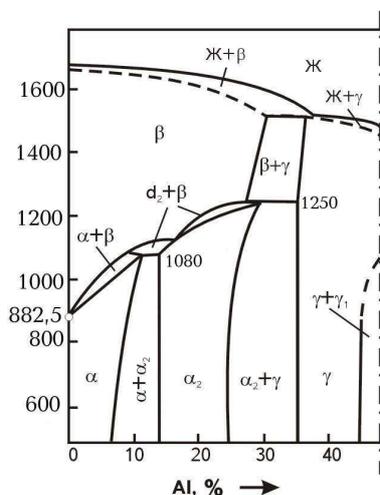


Рис. 1. Диаграмма состояния системы <Ti-Al>

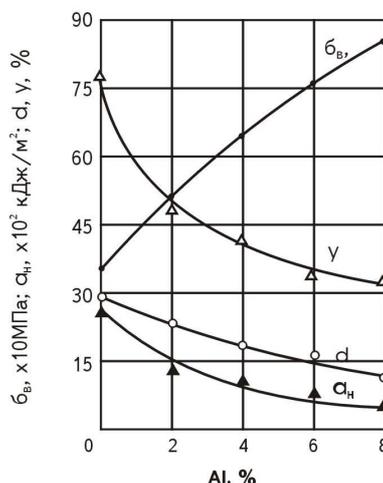


Рис. 2. Влияние Al на механические свойства Ti

Поскольку титан и его сплавы подвергались армированию вольфрамовыми волокнами, то рассмотрим диаграмму состояния системы <Ti-W>. Установлено [6, 7], что в интервале перитектической (~ 1880°С) и эвтектоидной (~ 715° С) температур существуют β -фаза (до концентрационной кривой ~ 50... ~ 28% W) и (β - W)-фаза. Следовательно, при (1880°С достигается максимальная растворимость (~50%) W

в β -Ti. С понижением температуры до 715 °С растворимость уменьшается до (28% W. При этой же температуре, т.е. 715°C, β - фаза претерпевает эвтектоидный распад ($\beta \rightarrow \alpha + W$). Температура превращения β -Ti $\rightarrow\alpha$ - Ti снижается с увеличением содержания W от 882,5°C до 715°C при эвтектоидном составе. Максимальная растворимость W в α -Ti составляет ~0,8% при 715°C. Что же касается Ti, то его растворимость в W снижается от (8,0% при перитектической температуре ~1880°C) до ~5,0% при эвтектоидной (715°C).

При закалке из β -области сплавов, содержащих до ~20,0% W, β - фаза не сохраняется и превращается в неравновесную α' - фазу, имеющую характерную *мартенситную* структуру. В сплавах с более 25,0% W при закалке β - фаза полностью сохраняется. Кроме того, увеличение содержания W в сплаве понижает температуру мартенситного превращения и уменьшает количество (α' -фазы, которое при закалке, как отмечалось, переходит в α' - фазу).

Таким образом, система <Ti-W> образует ограниченные твердые растворы, в связи с чем в качестве упрочнителя были выбраны волокна W, т.е. композиция <Ti-W* >. Что же касается системы <Ti-Mo>, то (-Ti с Mo образуют непрерывный ряд твердых растворов подобно <Fe-Ni> сплавам. Линия солидуса повышается от температуры плавления Ti (~1670° С) до температуры плавления Mo (~2620° С). В этой связи возникает проблема сохранения целостности волокон Mo в композиции <Ti-Mo* > при прессовании и спекании, что требует сравнительно высоких температур (1150...1200 °С).

В таблице приведены механические свойства титана и его сплавов после отжига ($T_{от}=800..850^\circ\text{C}$, $\tau_{от} \approx 2$ ч) на мелкое зерно. Отметим, что стандартный сплав <BT1-1> по химическому составу (Ti \geq 99,1%) близок к технически чистому титану <BT1-00> [8]. Как и следовало ожидать, порошковые материалы, полученные горячим прессованием, по свойствам заметно уступают базовым (стандартным) материалам, т.е титану и его сплавам. Это объясняется прежде всего структурной пористостью $\theta \cong 4,0\%$. Безусловно, на формирование свойств определенное влияние оказывает и степень сращивания [9, 10], т.е установление металлической связи между частицами порошков. Остаточная пористость, хотя сравнительно и небольшая ($\theta \cong 4,0\%$), но существенно препятствует структурной консолидации компактируемых материалов. Вот почему это особенно отражается на ударной вязкости (KV) материалов. Как видно из таблицы, ударная вязкость по сравнению с базовым титаном и его сплавами составляет ~ 62,0(68,0%.

Свойства титана (Ti) и его сплавов (<Ti-4%Al> и <Ti-6%Al-4%V>), полученных горячей экструзией, по существу, такие же, как у аналогичных стандартных марок (см. табл.). Экструзия, совмещающая процессы формования и спекания, отличается сдвиговыми пластическими деформациями, вследствие которых обеспечивается беспористая структура ($\theta \cong 0\%$)металлокерамических материалов. На этой основе, а также ввиду наличия больших степеней деформаций ($\epsilon =60..90\%$, $4 \leq \lambda \leq 8$) достигается структурная консолидация (межчастичное сращивание) экструдированных материалов и изделий [9, 11, 12].

Определенный интерес представляют результаты испытаний металло-керамического титана, армированного волокнами вольфрама (W*), т.е. композиционного материала <Ti-W* >, полученного экструзией. Как и следовало

ожидать, прочность (σ_B) и вязкость (КС) композита $\langle Ti-W^* \rangle$ значительно возрастают: при объемном содержании 12,5 % W^* и 25,0% W^* в $\sim 1,3$ и $\sim 1,7$ раза соответственно. Следовательно, армирование позволяет существенным образом повысить прочность и пластичность композиционного материала, что практически невозможно осуществить на базовых материалах, подвергая их различным методам упрочнения, в том числе и механотермической обработке.

Лучшие результаты могут быть получены при совершенствовании технологии, включающей выбор и подготовку исходных материалов (матрицы и волокон), оптимизацию процессов экструзии и термической обработки. Это подтверждают и структурные исследования. Как видно из рис. 3 а, продолжительность спекания в течение ~ 1 ч при $1150^\circ C$ (в среде аргона марки $\langle A \rangle$) значительно повреждает волокна W^* . В результате взаимодействия с Ti (матрицей) образуется прослойка по всей длине волокна толщиной $3..4$ мкм, что, естественно, снижает механические свойства армированного титана. Микрорентгеноспектральным анализом выявлена следующая фрагментация фаз: $\alpha-Ti-(\alpha+\beta)-Ti-\beta-Ti-W$. Прослойки образуются почти на всех волокнах, что подтверждается рис. 3 б.

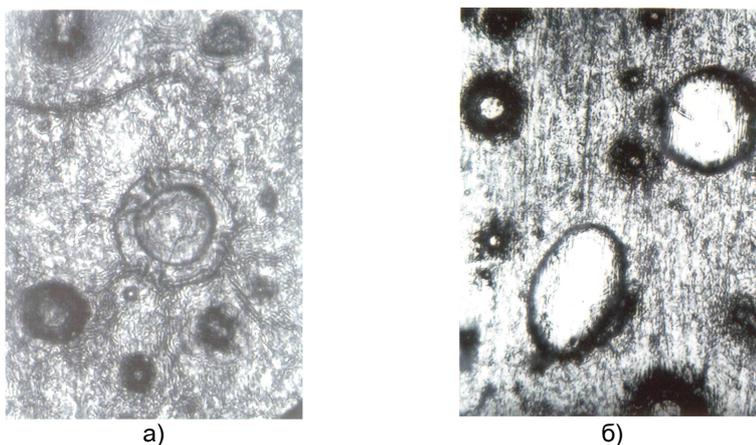


Рис.3. Структуры армированного титана $\langle Ti-W^* \rangle$, содержащего 12,5% об. W^* : а – спекание при $T_{ср}=1150^\circ C$ и $\tau_{ср}=1,0$ ч, экструзия при $T_{э}=1150^\circ C$ и $\lambda=4$; б – спекание при $T_{ср}=1150^\circ C$ и $\tau_{ср}=0,5$ ч, экструзия при $T_{э}=1150^\circ C$ и $\lambda=4$

Уменьшение продолжительности спекания до $\tau_{ср}=0,5$ ч заметно снижает толщину прослойки ($\sim 1..2$ мкм). Кроме того, на этом же микроснимке четко просматривается ориентация волокон W^* в направлении экструзии. Именно эта отличительная особенность делает процесс экструзии уникальным для синтеза композиционных материалов.

В заключение считаем необходимым отметить, что более перспективными являются титановые сплавы, армированные волокнами, в частности, на основе $\langle Ti-Al \rangle$, $\langle Ti-Al-V \rangle$, $\langle Ti-Al-Mo \rangle$ и др.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Петросян А.С.** Формирование структуры и свойств армированных композиционных материалов // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. –2001. - Т. 54, № 2. – С. 195 – 198.
2. **Петросян А.С.** Армированные материалы конструкционного назначения // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. –2002. - Т. 55, № 1. – С. 30-37.
3. **Вульф Б.К.** Термическая обработка титановых сплавов. – М.: Metallurgia, 1969. – 374 с.
4. **Wroblewski F.R., Harmon E.L., Troiano A.R.** I. Metals. - 1955.-V. 7, 1 2. - P. 413-419.
5. **Чечулин Б.Б., Ушаков С.С.** и др. Титановые сплавы в машиностроении. – Л.: Машиностроение, 1977. – 248 с.
6. **Еременко В.Н.** Титан и его сплавы. – Киев: АН УССР, 1960. – 500 с.
7. **Zwicker U.** Titan und Titanlegierungen. – New York, 1974. – 510 p.
8. Справочник металлста. – М.: Машиностроение, 1976. – Т.2. – 720 с.
9. **Манукян Н.В.** Технология порошковой металлургии. – Ереван: Айастан, 1986. – 234 с.
10. **Дорофеев В.Ю., Косококов И.А.** и др. Процессы сращивания в порошковой металлургии. – Новочеркасск, 1990. – 88 с.
11. **Штерн М.Б., Сердюк Г.Г.** и др. Феноменологические теории прессования порошков. – Киев: Наукова думка, 1982. – 140 с.
12. **Петросян А.С.** Экспериментально-теоретические исследования процессов экструзии металлокерамического титана и его сплавов // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. –2002. - Т. 55, № 3. – С. 371-378.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 5.04.2002.

Հ. Ս. ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ ՓՈՇԵՄԵՏԱԼՈՒԳԻԱԿԱՆ ԵՂԱՆԱԿՈՎ ՍՏԱՑՎԱԾ ՏՖՏԱՆԻ ԵՎ ՆՐԱ ՀԱՄԱՁՈՒԼՎԱԾՔՆԵՐԻ ՄԵԽԱՆԻԿԱԿԱՆ ՀԱՏՎՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԸ

Բերված են տաք մամլմամբ և արտամամբ ստացված տիտանի և նրա համաձուլվածքների մեխանիկական հատկությունների փորձնական հետազոտությունների արդյունքները: Տրվում է համանման բազային նյութերի նկատմամբ դրանց համեմատական գնահատականը:

H.S. PETROSSYAN MECHANICAL PROPERTIES OF THE TITANIUM AND ITS ALLOYS OBTAINED BY POWDER METALLURGY

Experimental investigation results on mechanical properties of titanium and its alloys obtained by hot pressing and extrusion are given. Their evaluation is compared with analogous basic materials.

С.Г. МАМЯН

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ СЛОИСТЫХ СТАЛЕЙ МЕТОДОМ ПОРОШКОВОЙ МЕТАЛЛУРГИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Предлагается технология получения высокопрочных слоистых композитных сталей с мягким поверхностным подслоем путем совмещения порошковой технологии и термомеханической обработки. Данная технология открывает новые возможности максимального использования прочностных ресурсов материалов.

Ключевые слова: термомеханическая обработка, слоистые композиты, запас прочности, мягкий подслои, трещиностойкость, предел выносливости.

В настоящее время весьма актуальной является разработка экологически чистых, ресурсосберегающих, прогрессивных технологий, обеспечивающих получение изделий с высокой прочностью, долговечностью и надежностью. Этим требованиям наиболее полно удовлетворяет технология получения стальных изделий методом порошковой металлургии с применением термомеханической обработки (ТМО). Ограниченность широкого использования этой уникальной технологии объясняется отсутствием фундаментальных металлургических исследований.

Максимальное использование прочностных ресурсов стали с одновременным снижением металлоемкости деталей и конструкций становится возможным при сочетании высокой прочности с пластичностью и трещиностойкостью материалов.

В [1, 2] приведены результаты исследований создания эффективной технологии получения высокопрочных цементованных деталей с применением высокотемпературной термомеханической обработки, минуя длительный диффузионный процесс цементации. Из железографитовой порошковой смеси с разным составом по углероду получают двухслойные брикеты типа цементованных (квазицементованных) путем поочередной их прессовки в одной пресс-форме. После спекания квазицементированные брикеты подвергались высокотемпературной термомеханической обработке. Данная технология обеспечивает постоянство концентрации углерода и поверхностной твердости по слою, что в сочетании с высокотемпературной термомеханической обработкой приводит к резкому повышению износостойкости и долговечности изделий. В табл. 1 приведены характеристики усталостной прочности (σ_1), работы разрушения образцов с мягким надрезом (КСУ) и трещиной (КСТ) обычной цементованной стали и квазицементованной порошковой стали.

Таблица 1

Механические свойства цементованных и квазицементованных
углеродистых сталей

Технология получения образца	%C после шлифовки		HRC поверх- ности	σ_{-1} , <i>МПа</i>	КСУ, <i>МДж/м²</i>	КСТ, <i>МДж/м²</i>
	сердце- вины	наруж. слоя				
Порошковая	0,20	0,90	60-61	460	0,8	0,5
	0,35	0,92	61-62	750	0,6	0,25
Обычная цементация	0,20	0,6-1,0	50-60	300	0,4	0,15
	0,35	0,5-1,0	50-61	250	0,3	0,10

Все известные способы изготовления конструкционных деталей из низкоуглеродистых сталей с последующей химикотермической обработкой или из среднеуглеродистых сталей в нормализованном или улучшенном состоянии с применением поверхностной закалки создают возможность лишь частичного использования прочностных ресурсов сталей. Обычные стали в высокопрочном состоянии ($\sigma_b = 1500 \dots 2500$ МПа и выше) склонны к хрупкому разрушению, особенно при низких температурах, и не могут быть использованы для высоконагруженных деталей и конструкций.

Известно, что цементация, широко используемая в технике, приводит к повышению износостойкости, усталостной и контактной прочности и одновременно резко снижает ударную вязкость стали. Максимальная прочность (σ_b) цементируемых сталей не превышает 1000...1100 МПа. При увеличении содержания углерода в сердцевине цементированной стали прочность сердцевины увеличивается, но σ_{-1} уменьшается (табл.1), т.к. уменьшаются сжимающие внутренние напряжения в наружном слое.

Если для достижения высокой прочности элемента в большинстве случаев величина пластичности не имеет решающего значения, то для детали способность к местной пластической деформации необходима для благоприятного (более равномерного) перераспределения напряжений.

При наличии неравномерности распределения напряжений, в особенности в присутствии острых надрезов (концентраторов) в сочетании с перекосами при растяжении, повышение сопротивления разрушению может быть достигнуто как изменением формы надреза для уменьшения начальной неоднородности, так и созданием поверхностного мягкого слоя для уменьшения конечной неоднородности.

В [3] было показано благоприятное влияние обезуглероживания на величину ударной вязкости высокопрочных сталей. Так, ударная вязкость образцов из стали типа 40ХН2МА после закалки с 950°C и отпуска при 150°C в течение 2 ч при $\sigma_b \approx 1900$ МПа при обезуглероживании надреза на глубину 0,1...0,15 мм достигала 0,91...0,95 МДж/м², при отсутствии обезуглероживания в надрезе средние значения ударной вязкости не поднимались выше 0,57 МДж/м².

Необходимо иметь в виду, что наличие мягкого слоя приводит к понижению пределов упругости и текучести и пределов выносливости. Мягкий слой понижает также сопротивление контактным нагрузкам – смятию и износу.

Анализируя положительные и отрицательные стороны вышеуказанных методов упрочнения сталей, нами разработаны различные технологии создания квазитрехслойных материалов с “мягким поверхностным подслоем”, дающие возможность максимального использования прочностных ресурсов стали. В данной работе рассматривается порошковая технология получения квазикомпозитных трехслойных материалов (рис.1). В процессе изготовления исходных пористых брикетов – заготовок с последовательным их прессованием между высокоуглеродистым поверхностным слоем (0,8...0,9 %C) и сердцевиной (0,45...0,8% C) образуется мягкий “низкоуглеродистый” подслои (0,15 ... 0,25 %C). Из соответствующих брикетов путем совмещения горячей деформации с термомеханической обработкой получены различные детали типа валов, шестеренок и образцы для механических испытаний.

При проектировании высокопрочных трехслойных материалов одной из основных задач является установление толщин поверхностных слоев. Толщина поверхностного квазицементированного слоя и “мягкого” подслоя была установлена экспериментально, основываясь на теоретических расчетах, исходя из условия нераспространения трещины и обеспечения оптимальной вязкости при использовании максимального ресурса прочности композита в целом. Вязкая прослойка (подслои) является демпфером для силовых виброколебаний, возникающих в поверхностном слое, и затрудняет зарождение микротрещины, а также блокирует развивающиеся с поверхности трещины, не давая им перейти в сердцевину, что могло бы привести к катастрофическому разрушению высокопрочной сердцевины.

Безусловно, трещина поверхностных слоев не должна превысить критический размер трещины данных материалов и в данных условиях работы.

По Ирвину [4], критический размер трещины подсчитывается по формуле

$$I_{кр} = \frac{K_{IC} [\Phi - 0,212(\sigma/\sigma_s)^2]}{1,21\pi\sigma^2},$$

где Φ – полный эллиптический интеграл второго рода, зависящий только от

геометрии трещины ($l/2a$): $\Phi = \int_0^{\pi/2} \left[1 - \left(\frac{a^2 - l^2}{a^2} \sin \varphi \right) \right]^{1/2} d\varphi$; K_{IC} – коэффициент

интенсивного напряжения при плоской деформации или критерия Ирвина; σ – рабочее напряжение.

При крайних значениях, когда $\sigma = \sigma_s$, примем:

$l/2a = 0,1$ (волосовины), тогда $[\Phi - 0,212(\sigma/\sigma_s)^2] = 0,89$;

- 1) $l/2a = 0,5$ (круглые плоские трещины), тогда $[\Phi - 0,212(\sigma/\sigma_s)^2] = 2,17$.

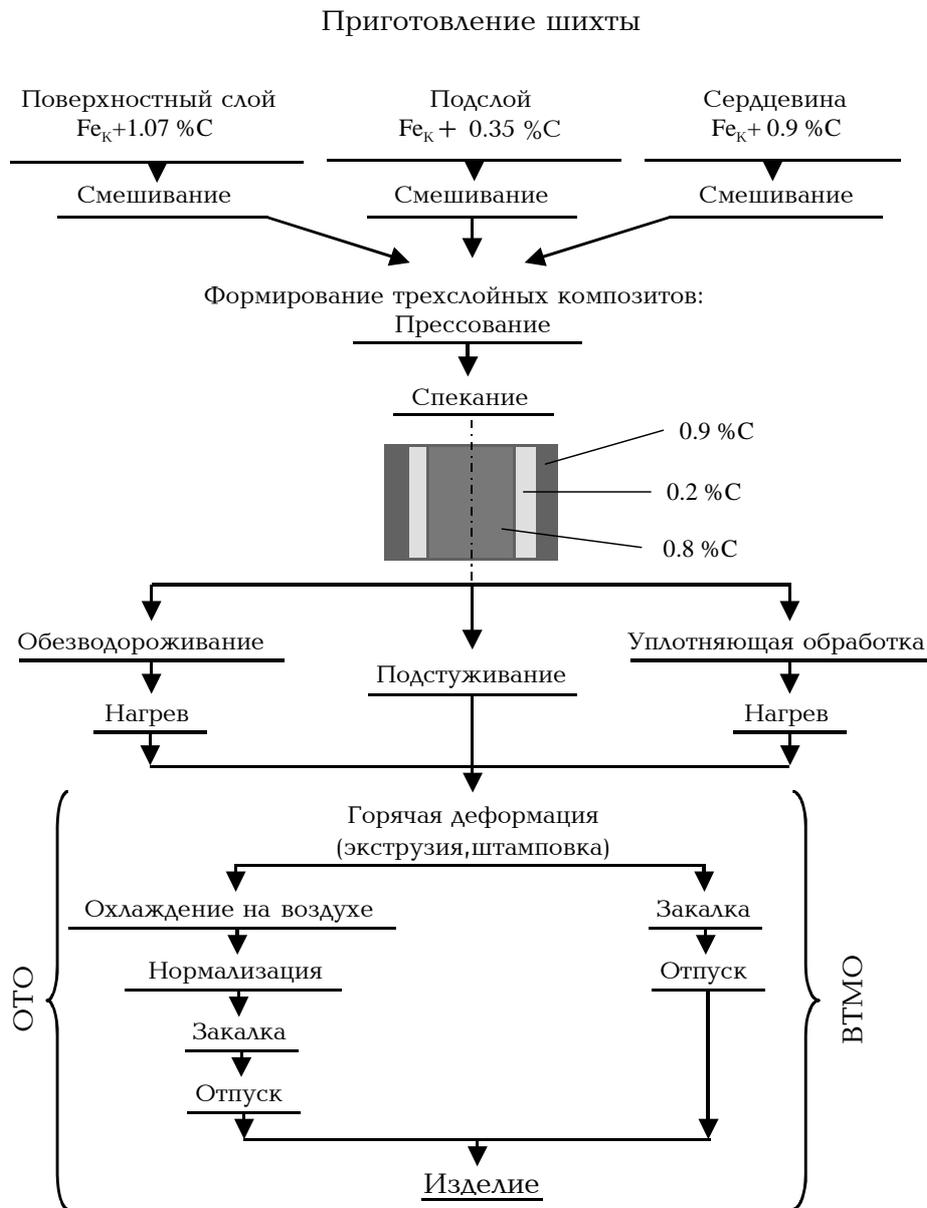


Рис.1. Технологическая схема получения трехслойных квазикомпонентов высокой прочности с применением ВТМО

Теперь можно рассчитать значение $L_{кр}$ для порошковых сталей П20 и ПУ8 после обычной термической обработки (ОТО) и высокотемпературной термомеханической обработки (ВТМО). Полученные результаты приведены в табл. 2.

При разработке технологии получения высокопрочного трехслойного макрокомпозита с мягким подслоем основой выбора толщины наружного прочного слоя (≈ 1 мм) и демпфирующего мягкого подслоя (≈ 1 мм) служили вышеуказанные расчеты.

Установлено, что эффективность метода резко увеличивается при применении ВТМО, которая сама по себе обеспечивает создание оптимальной субструктуры, имеющей наиболее благоприятное сочетание высокой прочности с повышенной пластичностью [5].

Таблица 2

Определение $L_{кр}$ для сталей П20 (А2) и ПУ8 (А2) после ОТО и ВТМО

Марка стали	L/2a	σ , МПа		K_{Ic} , МПа·м ^{1/2}		$L_{кр}$, мм	
		ОТО	ВТМО	ОТО	ВТМО	ОТО	ВТМО
Сталь ПУ8 (А2) (при статическом растяжении)	0,1	1400	1800	72	95	0,58	0,67
	0,1	1000	1600	80	100	1,53	0,94
	0,5	1400	1800	72	95	1,41	1,63
	0,5	1000	1600	80	100	3,73	2,30
Сталь ПУ8 (А2) (при усталости)	0,5	1400	1800	72	95	1,72	1,82
	0,5	1000	1600	80	100	4,19	2,56
Сталь П20 (А2) (при статическом растяжении)	0,1	1000	1200	85	120	1,73	2,40
	0,5	1000	1200	85	120	4,22	5,58
Сталь ПУ8 (А2) (при усталости)	0,1	800	1200	90	120	8,30	6,55
	0,5	1000	1400	85	110	4,73	4,04

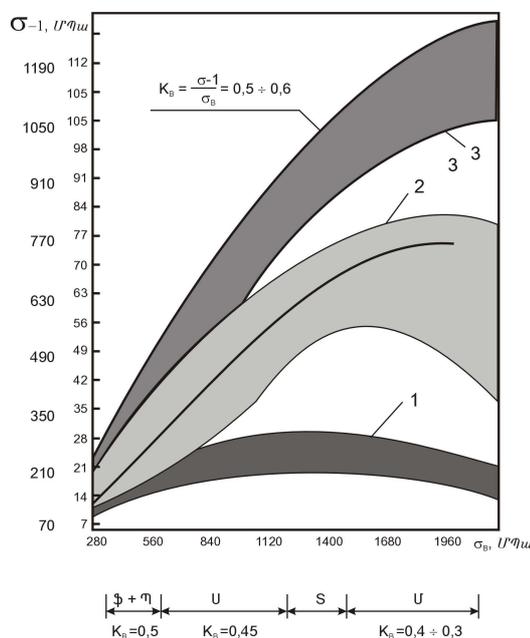


Рис.2. Зависимость предела выносливости (σ_{-1}) при изгибе от временного сопротивления (σ_B) сталей с различной структурой: 1 – монолитные стали с концентратором; 2 – монолитные стали без концентратора; 3 – композитная сталь с мягким подслоем (после ВТМО)

Анализ механических свойств, приведенных в табл. 3 и на рис.2, показывает, что наличие мягкого подслоя приводит к резкому повышению усталостной прочности и вязкости стали в высокопрочном состоянии. Особенно резко возрастает работа распространения трещины и, следовательно, надежность деталей.

Таблица 3

Механические свойства углеродистых сталей и макрокомполитов после ВТМО, $\lambda_{кр}=6$

Способ получения образцов	Температура отпуска, °С	σ_b , МПа	σ_{-1} , МПа	KCU, МДж/м ²	KCT, МДж/м ²
ПУ8(Feк+0,8%С) после ВТМО	250	2100	580	0,2	0,08
	300	2000	620	0,3	0,12
Трехслойный композит после ВТМО	250	2300	950	0,5	0,45
	300	2200	1000	0,6	0,50

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Мамян С.Г., Алаа Эльдин.** Термомеханическое упрочнение цементированных сталей // Изв. АН РА.- Сер. ТН. – Ереван.- 1993. – Т.XLVI, №3. – С. 21-29.
2. **Mamian S.G.** Creation of High-Strength Quasi – Composite Steels and Alloys of a New Class //New Processes and Application Experience: Materials of the Congress. – Moscow, 1990. – P. 196-201.
3. **Фридман А.Б.** Механические свойства металлов. Том 2. – М.: Машиностроение, 1974. –367 с.
4. **Иванова В.С., Гуревич С.Е. и др.** Усталость и хрупкость металлических материалов. – М.: Наука, 1968. – 211 с.
5. **Бернштейн М.П., Займовский В.А., Капуткина Л.М.** Термомеханическая обработка стали. – М.: Металлургия, 1983. – 477с.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 06.10.2001.

Մ.Գ. ՄԱՄՅԱՆ

ԲԱՐՁՐՁԵՐՄԱՍՏԻՃԱՆԱՅԻՆ ՋԵՐՄԱՍԵՆՔԱՆԻԿԱԿԱՆ ՄՇԱԿՄԱՆ (ԲՁՁՄ) ԿԻՐԱՌՄԱՍԲ ՓՈՇԵՄԵՏԱԼՈՒԴԳԻԱՅԻ ՄԵԹՈԴՈՎ ՇԵՐՏԱՎՈՐ ՊՈՂՊԱՏՆԵՐԻ ՄՍԱՅՄԱՆ ՏԵԽՆՈԼՈԳԻԱՅԻ ԱՌԱՆՁԱՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԸ

Ներկայացված է փոշեմետալուրգիայի տեխնոլոգիայի և ջերմամեխանիկական մշակման համատեղմամբ բարձրամուր, փափուկ մակերևութային ենթաշերտով կոմպոզիտային պողպատների ստացման տեխնոլոգիա, որը նոր հնարավորություններ է բացում նյութի ամրության պաշարի առավելագույն օգտագործման համար:

S.G. MAMYAN

TECHNOLOGICAL CHARACTERISTICS FOR OBTAINING FLAKY STEELS BY POWDER METTALURGY METHOD USING HIGH-TEMPERATURE THERMOMECHANICAL TREATMENT

The technology for obtaining high durable flaky composite steels with soft surface sublayer by combining powder technology with thermomechanical treatment is proposed. This technology opens up new possibilities for maximum application of durable material resources.

С.М. АЙРАПЕТЯН, Л.С. МАНУКЯН, А.С. БАБАНОВА, А.О. ТОНОЯН,
С.П. ДАВТЯН

ОСОБЕННОСТИ ФРОНТАЛЬНОЙ ИНИЦИИРОВАННОЙ РАДИКАЛЬНОЙ ПОЛИМЕРИЗАЦИИ АКРИЛАМИДА

При фронтальной полимеризации акриламида (ААм) наблюдаемая высокая предельная температура тепловых волн $>100^{\circ}\text{C}$ приводит к имидизации образовавшегося полиакриламида, в результате получается пространственно сшитый продукт. Показано, что добавки различных минеральных наполнителей (бентонит, мел и др.) приводят к образованию линейного растворимого полимера, близкого по своим свойствам промышленному полиакриlamиду. Исследовано влияние природы и концентрации инициатора на скорость фронта. Показано, что независимо от его природы порядок по инициатору соответствует $\sim 0,43$.

Ключевые слова: фронтальная полимеризация, реакционная зона, порядок, инициатор.

ВВЕДЕНИЕ. Фронтальная полимеризация - особый случай полимеризации в перемешиваемой среде, которая локализована в узкой реакционной зоне. При этом тепло, выделяемое при полимеризации одного слоя мономера, расходуется на активацию следующего, в результате чего происходит самораспространение полимеризационной волны. Температура в узкой реакционной зоне приближается к адиабатическому разогреву.

Большинство работ в этой области относятся к полимеризации жидких [1-10] и поликонденсации вязко-текучих [11-15] мономеров, в которых изучены структура тепловых автоволн [1,5-8,11,14,15], влияние различных кинетических факторов на скорость фронта [12-15], глубину превращения [2-8], молекулярно-массовые характеристики [7,9] и устойчивость [7,10,14,15] полимеризационных автоволн к разнохарактерным возмущениям.

При проведении фронтальной полимеризации жидких или вязко-текучих мономеров в вертикально установленных реакторах процесс сопровождается либо гравитационно-конвективным массопереносом [7,16] (тепловая волна распространяется сверху вниз), либо естественной тепловой конвекцией [15] (тепловая волна распространяется снизу вверх).

Несмотря на то, что в последнее время ведутся интенсивные работы в области фронтальной полимеризации твердых, кристаллических мономеров [17-20], возможные механизмы массопереноса для указанных сред не исследованы. Этот вопрос может иметь не только чисто научное, но и практическое значение.

Другим важным вопросом для процессов инициированной фронтальной полимеризации твердых, кристаллических мономеров является зависимость скорости передвижения фронта от начальной концентрации инициаторов. В работах [2, 21] показано, что для жидких мономеров порядок по инициатору зависит как от его природы, так и от природы мономера. Очевидно, что в свете этих данных представляет интерес выяснить, сохранится ли аналогичная зависимость при

фронтальной, инициированной полимеризации твердых, кристаллических мономеров.

Таким образом, целью данной работы является изучение кинетических особенностей инициированной фронтальной полимеризации ААм в зависимости от различных факторов - плотности упаковки мономера в реакционном сосуде, типа и концентрации инициатора в условиях распространения полимеризационной волны как сверху вниз, так и наоборот, и определение условий фронтальной полимеризации для получения полиакриламида, представляющего коммерческий интерес.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Исходные вещества. ААм очищали перекристаллизацией из раствора этилацетата, а инициаторы радикальной полимеризации - бензоил пероксида (БП) и динитрил азоизомасляной кислоты (АИБН) - двойной перекристаллизацией из раствора спирта.

Процесс полимеризации. Инициаторы полимеризации в определенных пропорциях вводили в ААм из раствора ацетона, а затем образцы сушили в вакуумном шкафу при комнатной температуре до постоянного веса.

Высушенные образцы ААм с инициатором порциями перемещали в реакционные сосуды в виде цилиндрических стеклянных ампул (с внутренним диаметром 5,0 мм) с последовательным их уплотнением.

Плотность упаковки ААм в реакционном сосуде определяли гравиметрически, рассчитывая объем образца по высоте его столбика в ампуле известного диаметра.

Скорость фронтальной полимеризации ААм в зависимости от различных параметров изучали в вертикально установленных стеклянных ампулах. Иницирование полимеризации осуществляли импульсным воздействием тепла на верхнюю или нижнюю часть реакционной системы, при этом соответственно полимеризационная волна распространялась сверху вниз или наоборот. За скоростью распространения фронта следили визуально, предварительно нанося разметки по длине реакционного сосуда. Температурные профили определяли посредством медь-константановой термопары, помещенной в ААм на глубину 1 см, на равном удалении от стенок реакционного сосуда.

Молекулярные массы и растворимость. Растворимость полиакриламида определяли экстракцией образцов водой в аппарате Сокслета. Наряду с растворимостью всего образца определяли также растворимость полимера, образующегося как у стенок реакционного сосуда, так и в центральной его части. С этой целью фронтальную полимеризацию ААм осуществляли в стеклянных ампулах диаметром 10,0 мм, затем отделяли продукт, образовавшийся у стенок реакционного сосуда (толщиной ~ 1,5 мм) от центральной его части.

Среднемассовую молекулярную массу (\bar{M}_w) полиакриламида определяли вискозиметрически в 1N водном растворе нитрата натрия при 30°C, по следующему уравнению [22]:

$$[\eta]=3,73 \cdot 10^{-4} \cdot \bar{M}_w^{0,66}.$$

Для определения \overline{M}_w использовали образцы наполненного перлитом полиакриламида (степень наполнения 40 масс.%). Полиакриламид отделяли от перлита последовательным растворением его в воде при 60°C с последующим высаждением его из водного раствора этиловым спиртом. Растворимость полиакриламида, образовавшегося у стенок реакционного сосуда, в среднем на 15 % масс. выше, чем у полимера в центральной его части.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Свойства полиакриламида. Попытки проведения фронтальной полимеризации ААм без инициаторов показывают, что независимо от места подачи тепла на реакционную систему формирование автоволновых режимов не наблюдается.

В случае, если количество тепла, подаваемого на реакционную систему, содержащую инициатор, недостаточно для плавления ААм в верхней или нижней части реакционной ампулы, формирование фронтальных стационарных режимов также не наблюдается. Необходимым условием для протекания фронтальной полимеризации является образование расплава мономера, то есть, фактически наблюдается псевдотвердофазная полимеризация. При этом фронт полимеризации распространяется со стационарной скоростью (рис.1), независимо от места подачи тепла, исключая начальный нестационарный участок.

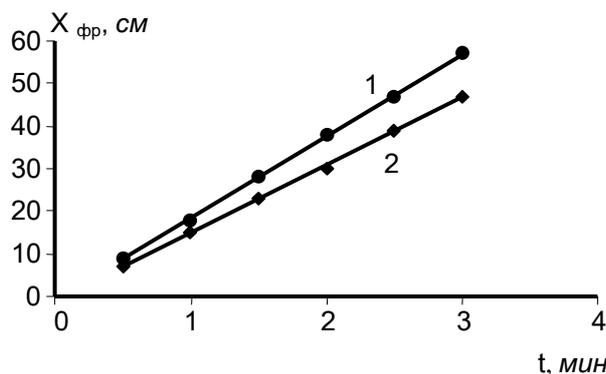


Рис. 1. Зависимость координаты фронта от времени для АИБН (1) и БП (2) при 0,5% (масс.) и плотности реакционных сред, г/см³: 0,9 (1); 1,0 (2)

Профиль температур, типичный для фронтальной полимеризации ААм, представлен на рис.2. Как видно, максимальная температура разогрева в реакционной зоне фронта под действием АИБН составляет 215°C. При полимеризации ААм, содержащего 4,5 масс. % персульфата калия, в работе [19] зафиксирована максимальная температура разогрева реакционной зоны 235°C, что довольно близко к данным, полученным нами, особенно учитывая более широкий диаметр сосуда (1 см) у американских исследователей.

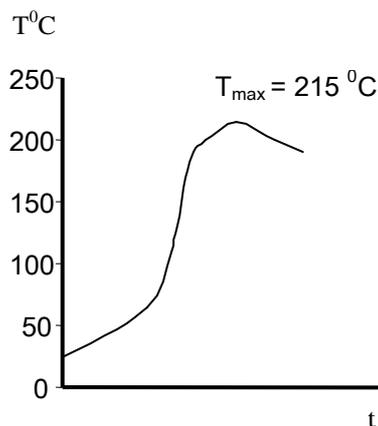


Рис. 2. Температурный профиль фронтальной полимеризации ААм. Инициатор АИБН 0,5% масс. от ААм

При температурах выше 100°C [23] протекает процесс имидизации полиакриламида с выделением аммиака (на что указывает реакция лакмусовой бумажки) и образованием сшитого полимерного продукта. Для получения полиакриламида со свойствами, аналогичными промышленному полимеру, в [19] предложили понизить температуру фронта путем разбавления реакционной среды либо инертным наполнителем (барий карбонат), либо промышленным или полученным в условиях фронтальной полимеризации полиакриламидом. При этом уже при массовом соотношении разбавителя к ААм 0,4-0,5:0,6-0,5 образуется линейный растворимый полимер, близкий по свойствам промышленному полиакриламиду. Нами также показано, что температуру фронта можно регулировать, используя в качестве разбавителей ААм широкий спектр как органических (полиэтилен, полипропилен), так и неорганических наполнителей (бентонит, мел, перлит, хлористый калий и др.) в широком диапазоне степеней наполнения (от 10 до 60 масс. %). По нашим данным, растворимость полиакриламида, образовавшегося у стенок реакционного сосуда, в среднем на 15% масс. выше, чем у полимера в центральной его части.

Это указывает на неоднородное распределение температуры, глубины превращения и степени сшивки по диаметру образца.

Определение глубины превращения, молекулярных масс и анализ золь-гель фракции образцов, полученных в условиях фронтальной полимеризации ААм, показали, что усредненные по диаметру образца свойства аналогичны полимеру, полученному в [19], и имеют среднemasсовую молекулярную массу порядка $1-2 \times 10^6$.

ВЛИЯНИЕ ПЛОТНОСТИ НА ДИНАМИКУ ПРОЦЕССА. Исследована зависимость скорости фронтальной полимеризации ААм (инициатор-ПБ) от плотности его упаковки в реакционном сосуде при распространении тепловых волн как сверху вниз, так и наоборот. При распространении тепловых полимеризационных волн вертикально сверху вниз (рис.3а, кр.1) скорость фронта в интервале плотностей упаковки ААм от 0,5 до 0,73 г/см³ практически постоянна и лишь несколько снижается при уплотнении ААм до 0,9 г/см³, а при распространении

тепловых волн в обратном направлении стационарная скорость фронта (рис.3а, кр. 2) практически не зависит от плотности системы (в пределах от 0,68 до 1,0 $г/см^3$). Интересно, что скорость ниспускающихся тепловых волн несколько выше поднимающихся, и лишь при плотности упаковки ААм 0,9 $г/см^3$ они сравниваются.

Наблюдаемая зависимость несколько необычна, так как предполагалось, что с увеличением плотности реакционной среды скорость распространения фронта полимеризации должна возрастать как за счет увеличения количества реагирующего вещества в единице объема, так и коэффициента теплопроводности среды.

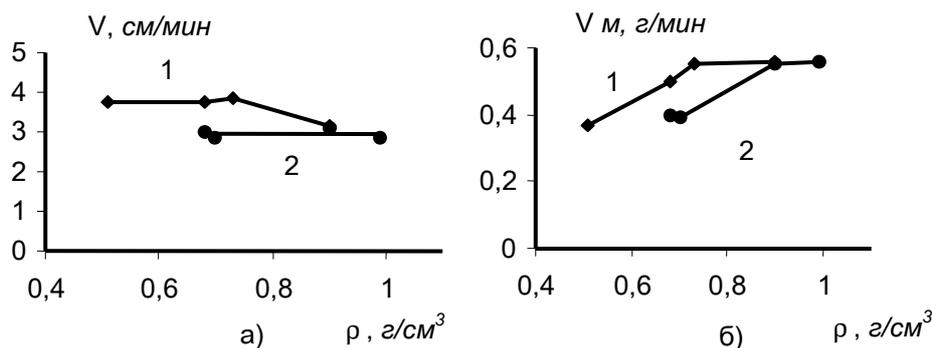


Рис. 3. Зависимость линейной (а) и массовой (б) скоростей полимеризационного фронта от плотности упаковки при распространении фронта сверху вниз (кр.1) и снизу вверх (кр.2), БП 0,5 %масс

Если данные, представленные на рис. 3а (кр.1 и 2), пересчитать на массовую скорость распространения фронта¹, то, как видно из рис.3б (кр.1 и 2), с увеличением плотности упаковки ААм выход полимера в единицу времени увеличивается и запределивается при повышенных плотностях. При этом в интервале плотностей 0,5...0,9 $г/см^3$ массовые скорости ниспускающихся тепловых волн больше, чем поднимающихся, и лишь при плотностях исходной реакционной среды 0,9 $г/см^3$ и выше они сравниваются.

Необходимо отметить, что, независимо от направления фронта (вертикально сверху вниз или снизу вверх), кристаллический ААм плавится из-за теплопроводности из зоны реакции в мономерную среду. Очевидно, что в случае ниспускающихся тепловых волн расплав мономера находится непосредственно под, а в случае поднимающихся -над зонами реакции. При этом распределение температуры в расплавленном мономере (зона разогрева) определяется не только теплопроводностью из зоны реакции в мономерную среду, но и поверхностной энергией натяжения кристаллического мономера, его смачиваемостью собственным расплавом и энтальпией плавления, а также гравитационным конвективным массопереносом расплавленного мономера в область кристаллического. Поэтому можно предположить, что причиной различия в скоростях ниспускающихся и поднимающихся тепловых волн является воздействие сил гравитации на расплавленный мономер. Это означает, что при малых плотностях исходной реакционной среды гравитационный конвективный массоперенос для ниспускающихся волн усиливает проникновение расплавленного мономера в свободный объем

кристаллического, что и приводит к возрастанию скорости распространения ниспускающихся волн по сравнению с поднимающимися волнами. При этом уже в области определенных плотностей реакционной среды (что в эксперименте соответствует плотности, равной примерно $0,9 \text{ г/см}^3$) гравитационный конвективный массоперенос уже не наблюдается. В свете сказанного представляет интерес выяснить, влияет ли наличие гравитационного конвективного массопереноса как на форму реакционной зоны, так и на границу раздела расплавленного и кристаллического мономеров. С этой целью в ряде опытов, после установления в системе стационарного состояния тепловых полимеризационных волн, вертикально установленная ампула поворачивалась под разными углами, вплоть до горизонтального состояния. Очевидно, что в случае превалирования роли гравитационного конвективного массопереноса, особенно в области низких плотностей, следовало ожидать изменения формы визуально наблюдаемых концентрических окружностей, характеризующих зону реакции и границу раздела фаз в формы горизонтально расположенных эллипсов. Однако оказалось, что независимо от плотности исходной реакционной среды ($0,68 \dots 1,0 \text{ г/см}^3$), диаметра реакционных ампул (5, 8, 10 мм) при различных углах поворота ($30, 60, 90^\circ$) границы как зоны фронта, так и раздела между расплавленным и кристаллическим мономерами оставались перпендикулярно продольной оси реакционных ампул. Подобное наблюдение, по-видимому, обусловлено тем, что даже в области малых плотностей превалирующими являются силы поверхностного натяжения расплавленного мономера. Следует также отметить, что в случае очень низких плотностей упаковки ААм ($\sim 0,5 \text{ г/см}^3$) при поднимающихся тепловых волнах иногда наблюдается остановка продвижения полимеризации из-за образования достаточно крупных дефектов-пустот, вплоть до разрыва цилиндрического столбика расплавленного мономера от кристаллического под воздействием сил гравитации. Этому процессу способствует также газовыделение, которым сопровождается фронтальная полимеризация ААм (за счет распада инициаторов полимеризации и имидизации полиакриламида).

При повышенных плотностях реакционной системы указанные эффекты максимально нивелируются, и, как видно из рис.3, скорости распространения ниспускающихся и поднимающихся фронтов уравниваются.

Следует отметить, что для поднимающихся тепловых волн в области плотностей ($0,56 \dots 0,7 \text{ г/см}^3$) особенно очевидным становится то, что фронт распространяется не равномерно, а рывками, с образованием очагов, напоминающих спиновые режимы фронтальной полимеризации. Подтверждением спиновых режимов, особенно при распространении фронта полимеризации снизу вверх, является то, что на полученных образцах полиакриламида наблюдаются характерные неоднородности в виде спиралей и колец.

ВЛИЯНИЕ ПРИРОДЫ И КОНЦЕНТРАЦИИ ИНИЦИАТОРА НА СКОРОСТЬ ФРОНТА. Еще в ранних работах [2, 24] было показано, что при фронтальной полимеризации 3-(оксиэтилен)- γ , ω - диметакрилата под высокими давлениями (до 5 кб) скорость фронта от начальной концентрации инициатора описывается степенной зависимостью $W \sim I_0^n$, где величина n зависит от природы инициатора и мономера, и для пероксидов: дитретбутила (т-БП), бензоила (БП), дициклогексил-

пероксидикарбоната (ДЦПК) получены значения 0,22; 0,32; 0,34 соответственно. При этом в случае фронтальной полимеризации метилметакрилата [2] под действием БП величина n принимает значение 0,36.

Опираясь лишь на эти результаты, можно было бы предположить, что подобное изменение величины n обусловлено специфическим воздействием высоких давлений на эффективность и объемы активации распада инициаторов. Однако в последнее время в [19] при изучении фронтальной полимеризации метакриловой кислоты и триэтиленгликольдиметакрилата в нормальных условиях для АИБН, пероксидов: кумила (ПК), лауриля (ЛП), (т-БП) и АИБН, БП, ЛП получили [21] для величины n соответственно. 0,24; 0,25; 0,27; 0,26 и 0,2; 0,23; 0,31. Поэтому, учитывая данные [2, 21, 24], в настоящее время для процессов фронтальной радикальной полимеризации жидких мономеров можно лишь зафиксировать невозможность объяснения сложной зависимости порядка по инициатору от природы как мономера, так и инициатора. Для полноты картины представляет также интерес исследование влияния природы и концентрации инициатора при радикальной твердофазной фронтальной полимеризации кристаллических мономеров.

На рис.4а,б представлен характер изменения скорости фронтальной полимеризации ААм от концентрации БП (рис.4а) и АИБН (рис.4б). Как видно, при плотностях упаковки 0,95...1,0 г/см³ для ниспускающихся (кр.1) и поднимающихся (кр.2) волн полученная зависимость практически одинаковая и описывается следующим уравнением: $W \sim [I_0]^{0,43-0,02}$, где $[I_0]$ - начальные концентрации БП или АИБН.

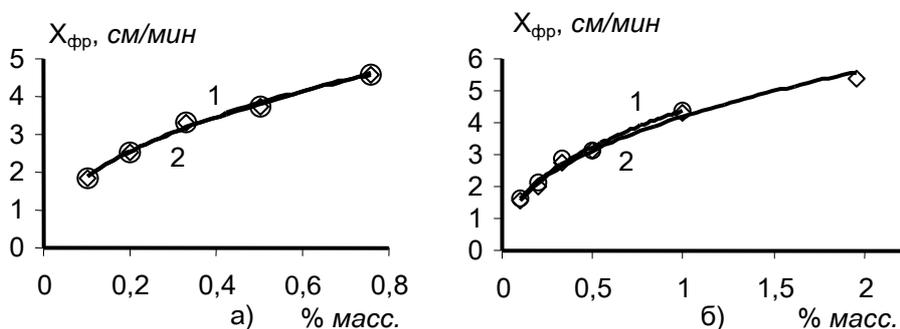


Рис. 4. Влияние количества АИБН (а) и БП (б) на скорости ниспускающихся (кр. а1, б1) и поднимающихся (кр. а 2, б 2) фронтов

Тот факт, что при фронтальной радикальной полимеризации ААм значение n не зависит от природы инициатора и близко к теоретическому [25], вносит еще большую неясность в понимание вопроса и требует серьезных дальнейших исследований в этом направлении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Чечило Н.М., Ениколопян Н.С.** // Докл. АН СССР.-1974.-Т.214, N5.- С.1131.
2. **Чечило Н.М., Ениколопян Н.С.** // Докл. АН СССР.-1975.-Т.221, N5.- С.1140.
3. **Давтян С.П., Сурков Н.Ф., Розенберг Б.А., Ениколопян Н.С.** // Докл. АН СССР.-1977.-Т.232, N2.- С.379.
4. **Алексянян Г.Г., Арутюнян Х.А., Боднева В.Л.** и др. // Высокомолек. соед. А.-1975.- Т.17, N2.- С.913.
5. **Давтян С.П., Жирков П.А., Вольфсон С.А.** // Успехи химии.- 1984.-N2.- С.251.
6. **Pojman J.A.** // J. Am. Chem. Soc.-1991.- V.113.- P.6285.
7. **Pojman J.A., Fortenberry D.I., Pyashenko V.M.** // Int. J. Self-Borogating High-Temperature Sintesis.-1997.-V.6, N3.-P.335.
8. **Davtyan S.P., Tonoyan A.O., Radugina A.A. end all** // Polymer Sci.-1999.-V41, N2.-P.242.
9. **Davtyan S.P., Tonoyan A.O., Radugina A.A. end all** // Polymer Sci.-1999.-V41, N2.-P.249.
10. **Davtyan S.P., Tonoyan A.O., Davtyan D.S., Savchenko V.I.** // Polymer Sci.-1999.-V41, N2.- P.257.
11. **Арутюнян Х.А., Давтян С.П., Розенберг Б.А., Ениколопян Н.С.** // Докл. АН СССР.-1975.-Т.223.- С.657.
12. **Сурков Н.Ф., Давтян С.П.** // Докл. АН СССР.- 1976.- Т.228.- С.141.
13. **Малкин А.Я., Бегишев В.П., Гусева Л.Р., Костарев К.Г.** // Высокомолек. соед. А. - 1994.-Т.36, N5.- С.759.
14. **Давтян Д.С., Багдасарян А.Э., Тоноян А.О., Давтян С.П.** // Химическая физика.- 2000.-Т.19, N9.- С.100.
15. **Давтян Д.С., Багдасарян А.Э., Тоноян А.О., Давтян С.П.** // Химическая физика.- 2000.-Т.19, N8.- С.83.
16. **Davtyan D.S., Bagdasaryan A.E., Tonoyan A.O., Davtyan S.P.** // Polymer Sci., Ser. A.- 2000.-V.42, N11.- 1197.
17. **Sevastyanov V.S., Kritskaya D.A., Ponomarev A.N., Pomogailo A.D.** // J. Polymer Sci., P.A., Polym. Chem.-1994.- V.32.- P.1201.
18. **Pojman J.A., Nagy I.P., Salter C.I.** // J. Am. Chem. Soc.-1993.- V.115.- P.11044.
19. **Fortenberry D.I., Pojman I.A.** // J. of Polym. Sci., P.A., Pol. Chem.- 2000.- V.38.- P.1129.
20. **Багян С.Э., Манукян Л.С., Хачатрян А.Р., Тоноян А.О., Давтян С.П.** // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН.- 2002.-Т.55, ¹ 1. - С. 38.
21. **Pojman J.A., Willis J., Fortenberry D.I., Pyashenko V.M., Khan A.M.** // J. of Polym. Sci.- 1995.- V. 33.- P.643.
22. Энциклопедия полимеров. - М.: Советская энциклопедия, 1972.- Т.1.- С.300.
23. **Савицкая Н.М., Холодова Ю.Д.** Полиакриламид. - Киев, 1969.
24. **Чечило Н.М., Ениколопян Н.С.** // Докл. АН СССР.-1976.-Т.230, N1.- С.160.
25. **Ханукаев Б.Б., Кожушнер М.А., Ениколопян Н.С.** // Докл. АН СССР.- 1974.-Т.214, N3.- С.625.

ГИУА, ИО и НХ ХАН РА. Материал поступил в редакцию 15.04.2002.

**Ս.Մ. ՀԱՅՐԱՊԵՏՅԱՆ, Լ.Ս. ՄԱՆՈՒԿՅԱՆ, Ա.Ս. ԲԱԲԱՆՈՎԱ,
Ա.Հ. ՏՈՆՈՅԱՆ, Ս.Պ.ԴԱՎԹՅԱՆ**

**ԱԿՐԻԼԱՄԻԴԻ ՖՐՈՆՏԱԼ ԻՆԻՑՎԱԾ ՌԱԴԻԿԱԼԱՑԻՆ ՊՈԼԻՄԵՐԱՑՄԱՆ
ԱՌԱՆՁՆԱՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԸ**

Ակրիլամիդի (ԱԱմ) ֆրոնտալ պոլիմերացման ժամանակ դիտվող $>100^{\circ}\text{C}$ ջերմային ալիքների բարձր սահմանային ջերմաստիճանը հանգեցնում է առաջացած պոլիակրիլամիդի իմիդացմանը, որի հետևանքով ստացվում է տարածական կարված արգասիք: Յույց է տրված, որ միներալային լցանյութերի հավելյարների ավելացումը (բենտոնիտ, կավիճ և այլն) բերում է զծային լուծելի պոլիմերի առաջացմանը, որն իր հատկություններով մոտ է արտադրական պոլիակրիլամիդին: Ուսումնասիրված է ակտիվարարի բնույթի և կոնցենտրացիայի ազդեցությունը ֆրոնտի արագության վրա, և ցույց է տրված, որ անկախ նրա բնույթից, կարգն ըստ ակտիվարարի համապատասխանում է $\sim 0,43$ -ի:

**S.M. HAYRAPETYAN, L.S. MANUKYAN, A.S. BABANOVA,
A.O. TONoyAN, S.P. DAVTYAN**

**PECULIARITIES OF THE INITIATED RADICAL FRONTAL ACRYL-AMIDE
POLYMERIZATION**

In acryl-amide frontal polymerization the high limiting $>100^{\circ}\text{C}$ of the thermal waves leads to imidization of the polyacryl-amide to be formed resulting in space cross-linking products. The nature and concentration influence of the initiator on the front rate is studied. It is shown that the use of mineral additives (bentonite, chalk, etc.) brings to formation of the linear soluble polymer with similar properties as the industrial one. The nature and concentration influence of the imitiator on the front rate is studied. It is shown that irrespective of its nature, the order of initiator corresponds to $\sim 0,43$.

С.А. МАЛХАСЯН, Дж.А. ГЕДАКЯН, В.С. МАЛХАСЯН

ДЕРИВАТОГРАФИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СПЕЧЕННЫХ КОМПОЗИЦИЙ НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА

Приведены результаты дериватографических исследований влияния температуры на структуру и фазовые превращения спеченного железа различной пористости с добавками. Полученные данные позволяют более рационально использовать разработанные материалы в узлах трения в зависимости от нагружения, скорости скольжения и генерируемой при этом температуры.

Ключевые слова: контактирование поверхностей, нагрев, окисление, тонкие пленки, превращения.

В процессе трения контактирование поверхностей осуществляется локально, т.е. на отдельных участках, вследствие чего температура в зоне контакта (в микрообъемах) может колебаться в широких пределах: от комнатной до температур плавления сопряженных материалов.

В этой связи представляет интерес влияние температуры на структуру и фазовые превращения спеченного железа, легированного различными элементами (см. табл.). Эти процессы исследованы нами методами дериватографии.

Таблица

Состав и пористость исходных материалов

Спеченный материал	Легирующие элементы, %				Пористость, %
	S	P	C	TiC	
1. Fe	-	-	-	-	18-20
2. FeS	0,7-1,0	-	-	-	18-20
3. FeP	-	0,8-1,0	-	-	18-20
4. Fe-P-S	0,7-1,0	0,5	-	-	18-20
5. Fe-P-S	0,7-1,0	0,5	-	-	0
6. Fe-P-S-C	0,7-1,0	0,5	0,8-1,0	-	0
7. Fe-P-S-C-TiC	0,7-1,0	0,5	0,8-1,0	6	0

Нагрев образцов до 1000°C осуществлялся в воздушной среде, скорость нагревания около 5°C в мин. В качестве эталонного вещества использовались никелевые образцы. Никель является коррозионностойким металлом в сухой и влажной атмосфере, так как обладает малым сродством к кислороду. Кроме того, вплоть до температуры плавления у него отсутствуют аллотропические превращения [1]. Образцы и эталоны были изготовлены цилиндрической формы (\varnothing 10, H=15 мм) с проемом (\varnothing 3, h=10 мм) для закладки термпары. Дериватограммы приведены на рис.1.

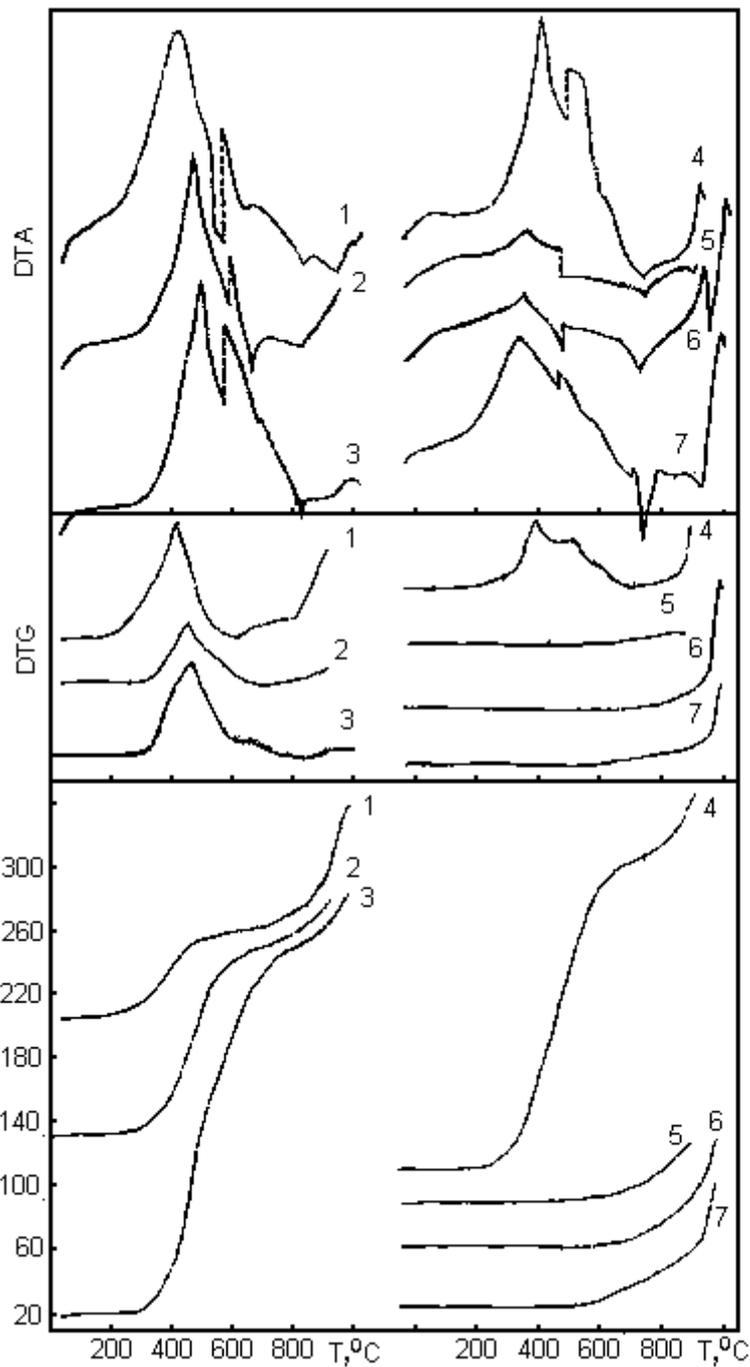


Рис. 1. Дериwаtограммы исследуемых материалов: 1 – Fe, 2 – FeS, 3 – FeP, 4 – Fe-P-S (номера 1-4 пористые: $\Theta=18-20\%$), 5 – Fe-P-S, 6 – Fe-P-S-C, 7 – Fe-P-S-C-TiC (номера 5, 6, 7 – беспористые)

Как видно, окисление железного образца без добавок (кр. 1) происходит одновременно с нагревом, и вскоре на поверхности образуется налет в виде слоя

продуктов реакции. Даже при очень малых толщинах эти слои можно обнаружить по характерным интерференционным цветам, которые впоследствии, когда их толщина достигает некоторой определенной величины, исчезают и переходят в собственный цвет соответствующего окисла. Процесс окисления, протекающий до 572°C, достигает максимума при 390°C. При этом в интервале температур 290...480°C кинетика окисления подчиняется параболическому закону $\Delta m = K\sqrt{t}$, где Δm – измеренное увеличение массы образца; t – время.

Однако изучение окисления железа при 20...400°C представляется затруднительным ввиду сложности определения строения окисных пленок из-за их малой толщины. Поэтому для идентификации известных окислов железа рекомендуется использовать методы трансмиссионной электронной микроскопии [2-4]. Так, с помощью УЭМВ-100В на участках разделительных пленок были обнаружены окислы α -Fe₂O₃, и Fe₃O₄, а также монокристаллическая гидроксид FeO(OH) [4]. Образование последней можно объяснить влиянием деформаций, так как пленки были идентифицированы после испытания материалов на трение и износ.

В [2] установлено, что пленки, возникающие при комнатной температуре, состоят или из γ -Fe₂O₃, или из окисла, состав которого лежит между γ -Fe₂O₃ и смесью 20% Fe₃O₄+80% γ -Fe₂O₃. В интервале температур 80...120°C окисленная пленка представляет собой γ -Fe₂O₃, а выше 130°C появляется фаза α -Fe₂O₃. При 180°C состав слоя пленки переходит в Fe₃O₄. При температурах 300...350°C и до 570°C пленка состоит из двух слоев – α -Fe₂O₃ и Fe₃O₄. При этом образование закиси железа обычно не наблюдается, так как закись FeO (вюстит) ниже 570°C неустойчива.

В соответствии с диаграммой состояния системы <железо-кислород> различают две температурные области окисления железа [5]. При температурах ниже 570°C продуктом окисления является слой Fe₃O₄, затем формируются слои γ - и α -Fe₂O₃. При этом скорость окисления определяется только скоростью роста слоя Fe₃O₄. При температурах выше 570°C большая часть окалина состоит из FeO и только наружный тонкий слой состоит из Fe₃O₄ и Fe₂O₃. Выше 572°C (дериватограмма 1) окисление протекает без экзотермии, и при 759°C выявляется другой пик (значение которого несколько отличается от литературных данных – 768°C [6]), характерный для фазовых переходов II рода (магнитное превращение α – β). Следующий максимум соответствует β – γ превращению, происходящему при 910°C. При этом выявлена характерная особенность низкотемпературного окисления спеченного железа: окисление сначала идет с очень высокой скоростью, затем постепенно убывает. Это можно объяснить как пористостью, т.е. весьма разветвленной и активной поверхностью, так и образованием и утолщением пленки твердой окалина, затрудняющей процесс окисления. Это дает основание предположить, что скорость окисления в атмосферных условиях лимитируется не скоростью реакции на границе фаз, а скоростью доставки кислорода на реакционную поверхность.

Таким образом, состав тонких окисных пленок схематически можно изобразить в виде последовательно расположенных слоев: Fe/Fe₃O₄ (Fe₂O₃)/FeO (Fe₃O₄, Fe₂O₃)/O₂ (газ) (рис. 2).

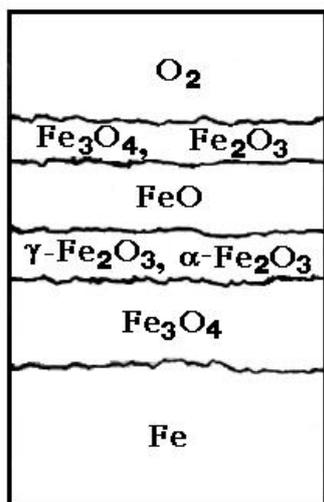


Рис. 2. Предположительная модель состава окисной пленки на поверхности спеченного железа

Для пористых образцов из FeS, FeP и Fe-P-S процесс интенсивного окисления смещается вправо (кр. 2, 3, 4), достигая максимума соответственно при 438 и 450°C, а для беспористых образцов – из Fe-P-S, Fe-P-S-C и Fe-P-S-C-TiC – пик отмечается при 380...390°C (кр. 5, 6, 7).

Согласно диаграмме состояния <железо-сера> [5], существует несколько аллотропических форм сульфида железа, температуры превращения которых находятся при 138 и 325°C. Однако на дериватограмме эти два превращения нами не выявлены, а магнитное превращение происходит при 761°C.

Для композиции FeP (кр. 3) α/β превращение имеет место при 752°C, а $\beta \rightarrow \gamma$ – при 913°C. В [7] $\alpha \leftrightarrow \beta$ превращение обнаружено при 900°C (P=0,1%), а при 0,83% P оно уже не выявлено.

Для Fe-P-S ($\Theta \approx 20\%$) эти превращения происходят соответственно при 763 и 935°C, а для беспористой композиции – 771 и 916°C (кр. 4 и 5). Для беспористых композиций Fe-P-S-C и Fe-P-S-C-TiC температуры превращений соответственно находятся при 752 и 940°C (кр. 6) и 770 и 942°C (кр. 7).

Таким образом, установленные закономерности окисления и фазовых превращений подтверждаются литературными данными по фазовым превращениям в системах <Fe-P-S-C-TiC-O> и связывают их с плотностью образцов. Полученные результаты позволяют более рационально использовать разработанные материалы в зависимости от нагружения, скорости скольжения и генерируемой при этом температуры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Конструкционные материалы ядерных реакторов / Под ред. **Бескорвайного Н.Н.** – М.: Атомиздат, 1977. – 256 с.
2. Окисление металлов / Под ред. **Бенара Ж.**; Пер. с франц. – М.: Металлургия, 1969. – 444 с.
3. **Кофстад П.** Высокотемпературное окисление металлов. – М.: Мир, 1969. – 392 с.
4. **Манукян Н.В., Багдасарян Г.Б., Полотай В.В., Юга А.И., Малхасян С.А.** Антифрикционные свойства спеченных материалов на основе железа, содержащих серу и фосфор // Порошковая металлургия. – 1977. – С. 81-86.
5. **Вол А.Е.** Структура и свойства двойных металлических систем. Т. II. – М.: Физматгиз, 1962. – 982 с.

6. **Григорович В.К.** Электронное строение и термодинамика сплавов железа – М.: Наука, 1970. – 292 с.
7. **Самсонов Г.В., Верейкина Л.Л.** Фосфиды. – Киев. Изд-во АН УкрССР, 1961. – 128 с.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 03.03.2001.

Մ.Ա. ՄԱԼԽԱՍՅԱՆ, Ջ.Ա. ԳԵԴԱԿՅԱՆ, Վ.Ս. ՄԱԼԽԱՍՅԱՆ

**ԵՐԿԱԹԻ ՀԻՄՔՈՎ ԵՌԱԿԱԼՎԱԾ ԿՈՄՊՈԶԻՑԻԱՆԵՐԻ ԴԵՐԻՎԱՏՈԳՐԱՖԻԿ
ՀԵՏԱԶՈՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԸ**

Բերված են տարբեր ծակոտկենության հավելանյութերով եռակաված երկաթի կառուցվածքի և ֆազային փոխարկումների վրա ջերմաստիճանի ազդեցության դերիվատոգրաֆիկ հետազոտությունների արդյունքները: Ստացված տվյալները թույլ են տալիս մշակված նյութերն ավելի նպատակահարմար օգտագործել շփման հանգույցներում՝ կախված բեռնավորումից, սահքի արագությունից և այդ դեպքում առաջացող ջերմաստիճանից:

S.A. MALKHASSYAN, J.A. GEDAKYAN, V.S. MALKHASSYAN

**DERIVATOGRAPHICAL STUDIES IN SINTERED COMPOSITION BASED ON
IRON**

Derivatographical investigation results of temperature influence on the structure and phase transformation of sintered iron with various porosity and additives are given. The data obtained allow to use more rationally the developed materials in friction units depending on loading, sliding speed and temperature thus generated.

К.В. АЛЕКСАНДРЯН, Р.Г. ХАНОЯН

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ ПЛОСКОЖИДКОСТНЫХ ЛОПАСТЕЙ ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ФОРМЫ ВРАЩАЮЩЕГОСЯ ОСЕВОГО КОНТАКТНОГО ТЕПЛООБМЕННИКА

Получено уравнение, определяющее условие постоянства скорости воды, вытекающей из продольной прорези (от оси вращения лопасти к периферии), вращающейся в горизонтальной плоскости трубы, формирующей плоскожидкостную струю в виде прямоугольной лопасти осевого вентилятора.

Ключевые слова: контактный теплообменник, плоскожидкостная струя, тепло- и массообмен.

Использование низкотемпературных вторичных вод энергетических установок, в частности ТЭС, привлекает большое внимание, поскольку воды с температурой 25...30°C на этих предприятиях имеется в больших количествах. Промышленная утилизация тепла низкого потенциала (сбросного тепла) указанных вод является одним из наиболее трудно разрешимых вопросов. Использование низкотемпературных источников тепла при обычных системах отопления практически невозможно вследствие резкого увеличения теплоотдающих поверхностей и габаритов обогревающих устройств.

Нами разработан вращающийся осевой контактный теплообменник с вертикальной осью вращения, у которого лопасти из традиционных материалов заменены плоскими струями теплоносителя (воды, газожидкостной смеси), имеющими форму лопастей, выполняющими функции теплоотдающих поверхностей, нагнетателя воздуха и сил, приводящих во вращение теплообменник, т.е. устройство совмещает в одном узле функции нагревателя, нагнетателя воздуха и приводной машины. Теплообменник размещается под кровлей обогреваемого помещения [1] (рис.1).

В разработанном теплообменнике по сравнению с аналогичными устройствами отсутствуют: электрическая энергия на привод вентилятора; аэродинамическое сопротивление по проходу воздуха через живое сечение нагревательной решетки и лопасти из твердых материалов, что снижает удельную материалоемкость нагревателя, упрощает его конструкцию, исключает затемнение помещения и создает условия для контактного способа теплообмена, который допускает более полное использование тепла, чем поверхностный теплообмен [2].

Контактный теплообменник содержит корпус 19 с вращающимися водораспределителем 32 и водоприемниками 40, выполненными в виде овальной камеры, равной длине жидкостной лопасти с приемной продольной щелью; неподвижный кольцевой водосборник 41 с верхним приемным просветом, расположенным в плоскости вращения водоприемников 40, и коллектор 35. Водораспределитель 32 снабжен трубами 39, имеющими щелевые продольные

прорези по длине их образующих с радиальной осью, наклоненные к плоскости вращения водораспределителя и заглушенные по периферийным концам. Корпус 19 с водораспределителем 32 установлен с помощью подшипников 12, 21 на неподвижной трубе-подвеске 20, с которой посредством стержней 42 жестко связан водосборник 41, снабженный водоотводящими трубами 38.

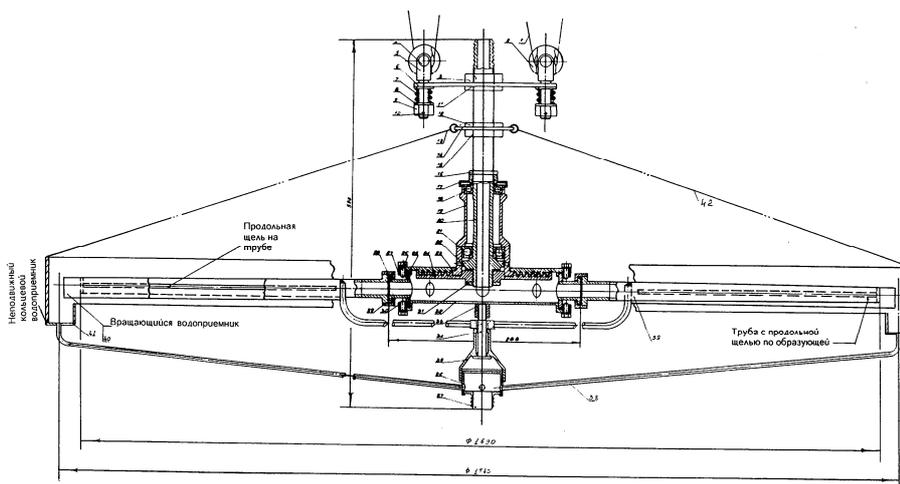


Рис.1. Вращающийся осевой контактный теплообменник с плоскожидкостными лопастями (общий вид)

Контактный теплообменник работает следующим образом: теплоноситель-вода подается по трубе-подвеске 20 в корпус 19, заполняет водораспределитель 32 и, проходя длину труб 39, вытекает в виде плоских струй через их продольные щелевые прорезы по образующим, вращая при этом корпус 19 с водораспределителем 32 и водоприемниками 40 за счет реакций струй. Под давлением ударов масс струй, имеющих форму лопастей, расположенных напротив продольных прорезов труб 39, водоприемники 40 отталкиваются, образовав просвет, который является шириной лопасти при данном гидравлическом режиме. Согласно перепаду давления теплоносителя, просвет ширины жидкостной лопасти сжимается посредством пружин, установленных на периферийных концах водоприемников 40, что исключает протекание жидкости в помещение.

Плоские струи теплоносителя в виде лопастей вентилятора проходят через слой воздуха и путем непосредственного контакта интенсивно отдают свое тепло воздушной среде, одновременно увлажняя ее. Поскольку струи теплоносителя наклонены к плоскости вращения водораспределителя 32, то их вращение приводит к перемешиванию и нагнетанию воздуха, что способствует интенсификации тепло- и массообмена. Затем они попадают в водоприемники 40, откуда через концевые отверстия в неподвижный кольцевой водосборник 41, из которого отводятся по трубам 38 в коллектор 35. В процессе теплообмена также участвуют водоотводящие трубы и коллектор.

Отсутствие приводной машины, небольшой вес, направление движения потоков нагретого воздуха (вниз по вертикальной оси) позволяют размещать

теплообменник в верхней части помещения. В процессе обогрева нагреваемые и нагнетаемые его лопастями объемы воздуха проходят расстояние, равное двойной высоте обогреваемого помещения. Происходит активное перемешивание разнотемпературных слоев, формируя в итоге равномерно распределенное температурное поле, что снижает теплотери, в частности в теплицах, на 18...22% вследствие нарушения хода естественной конвекции и исключения скоплений под кровлей воздушных масс с температурой выше производственной зоны.

Все гидроаэродинамические и тепло- и массообменные процессы теплообменника обусловлены расходом теплоносителя, который формирует плоские струи в виде лопастей, вытекающие из продольных щелевых прорезей труб, установленных на водораспределителе, с определенной скоростью, характеризующей работу устройства.

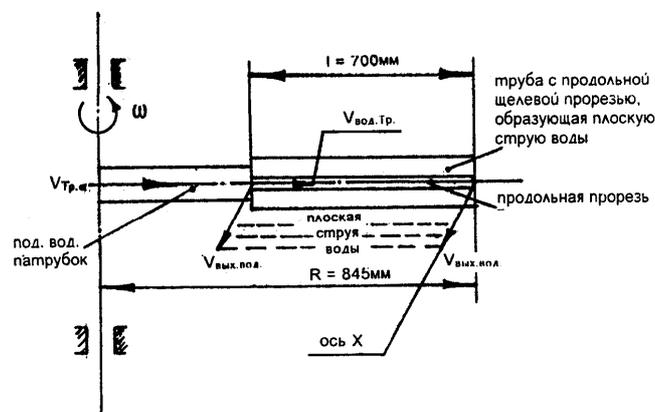


Рис. 2. Скорости воды (теплоносителя) на разных участках трубы с продольной щелевой прорезью, образующей плоскожидкостную струю

В данной работе приводится характер образования плоскожидкостных струй с правильной геометрической формой в виде прямоугольника.

Имея в основе уравнение Бернулли, т.е. из закона сохранения энергии, определяем скорость ($V_{\text{вых.вод.}}$, рис.2) выхода воды из щелевой прорези трубы, формирующей плоские струи :

$$\frac{V_{\text{о.тр.}}^2}{2} + \frac{P_0}{\rho_{\text{вод}}} + gh_0 = \frac{V_{\text{вых.вод.}}^2}{2}, \quad (1)$$

где $V_{\text{о.тр.}}$ – средняя скорость потока воды (теплоносителя) в трубах с продольными щелевыми прорезями, м/с, равная

$$V_{\text{о.тр.}} = \frac{Q}{n\pi d_{\text{тр.}}^2 / 4};$$

Q - объемный расход воды, м³/с; n - число труб с продольными прорезями; $\pi d_{\text{тр.}}^2 / 4$ - площадь поперечного сечения трубы с продольной щелевой прорезью, м²; P_0 - гидростатическое давление воды на стенке трубы с щелевой прорезью, Па (игнорируем); $\rho_{\text{вод.}}$ - плотность воды, кг/м³; gh_0 - гидродинамическое давление,

определяемое высотой подачи воды, $m/c^2 \cdot m$; g - ускорение свободного падения, m/c^2 .

Таким образом, по заданным значениям $V_{o.тр.}$ и h_0 определяем начальную скорость истечения воды из прорези, формирующей плоскую струю трубы :

$$V_{\text{вых.вод}} = \sqrt{V_{o.тр.}^2 + 2gh_0}, \text{ м/с.} \quad (2)$$

Определим распределение скорости ($V_{\text{вых.вод}}$) струи воды по длине трубы с щелевой прорезью.

Элементарный массовый расход воды из прорези трубы dm_t [$кг/с$] на элементарной длине трубы dl составит:

$$dm_t = \rho_{\text{вод}} \delta V_{\text{вых.вод}} dl,$$

где $\rho_{\text{вод}}$ - плотность воды, $кг/м^3$; δ - толщина струи, $м$, определяемая из условия сохранения конфигурации струи с учетом подъемной силы воздуха (формула Жуковского) [3].

Остаток массового расхода воды после истечения из первой элементарной длины можно записать

$$m_{t,0} - dm_t = \rho_{\text{вод}} \frac{\pi d_{тр.}^2}{4} (V_{o.тр.} - dV_{\text{вод.тр.}}), \quad (3)$$

где $m_{t,0}$ - начальный массовый расход воды в трубе, $кг/с$; $V_{o.тр.}$ - начальная скорость воды в трубе с прорезью, $м/с$, равная $V_{o.тр.} = \frac{Q}{N \frac{\pi D^2}{4} \rho_{\text{вод}}}$, Q - общий расход

воды из всех труб, $кг/с$.

Подставляя значение dm_t в (3), получим

$$m_{t,0} - \rho_{\text{вод}} \delta V_{\text{вых.вод}} dl = N \frac{\pi d_{тр.}^2}{4} \rho_{\text{вод}} (V_{o.тр.} - dV_{\text{вод.тр.}}).$$

Для текущего расхода воды по длине трубы $m_{t,l}$ и текущей скорости воды $V_{\text{вод.тр.}l}$ по длине трубы имеем

$$\rho_{\text{вод}} \delta V_{\text{вых.вод}} dl = \frac{\pi d_{тр.}^2}{4} \rho_{\text{вод}} dV_{\text{вод.тр.}l}. \quad (4)$$

Связь между $V_{\text{вод.тр.}l}$ и $V_{\text{вых.вод}}$ устанавливается уравнением Бернулли

$$\frac{V_{\text{вод.тр.}l}^2}{2} + gh_0 = \frac{V_{\text{вых.вод}}^2}{2}.$$

Отсюда

$$V_{\text{вод.тр.}l} = \sqrt{2 \left(\frac{V_{\text{вых.вод}}^2}{2} - gh_0 \right)}.$$

Дифференцируя это выражение, получим

$$dV_{\text{вод.Тр.}l} = \frac{1}{2} 2 \left(\frac{V_{\text{вых.вод.}}^2}{2} - gh_0 \right)^{-1/2} d \left(\frac{V_{\text{вых.вод.}}^2}{2} \right) = \frac{V_{\text{вых.вод.}} dV_{\text{вых.вод.}}}{\sqrt{\frac{V_{\text{вых.вод.}}^2}{2} - gh_0}}$$

Подставляя результат дифференцирования в (4), получим окончательное дифференциальное уравнение, выражающее изменение величины $V_{\text{вых.вод.}}$ по длине l трубы с продольной щелевой прорезью (имея началом ось вращения) :

$$\delta V_{\text{вых.вод.}} dl = \frac{\pi D_{\text{тр.}}^2 V_{\text{вых.вод.}} dV_{\text{вых.вод.}}}{4 \sqrt{\frac{V_{\text{вых.вод.}}^2}{2} - gh_0}}$$

или

$$dl = \frac{\pi D_{\text{тр.}}^2}{4 \delta} \frac{dV_{\text{вых.вод.}}}{\sqrt{\frac{V_{\text{вых.вод.}}^2}{2} - gh_0}} \quad (5)$$

Интегрируя (5), получим

$$\ln[V_{\text{вых.вод.}} + \sqrt{\frac{V_{\text{вых.вод.}}^2}{2} - 2gh_0}] = \frac{\delta}{\pi D_{\text{тр.}}^2} \quad (6)$$

Уравнение (6) преобразуем для инженерных расчетов с погрешностью не более 5% в виде

$$V_{\text{вых.вод.}} = 10,3 \dots 5,84 l$$

На рис.3 приводится график $V_{\text{вых.вод.}} = f(l)$ при заданном значении h_0 (высоты подачи воды).

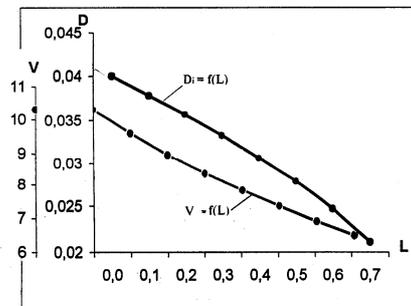


Рис.3. $V=f(L)$ – изменение скорости струи ($V_{\text{вых.вод.}}$), вытекающей из щелевой прорези вдоль трубы с неизменным диаметром ;

$Di=f(L)$ – изменение диаметра трубы при постоянной скорости ($V_{\text{вых.вод.}}$) струи, вытекающей по всей длине щели

Определим условие постоянства скорости воды ($V_{\text{вых.вод.}}=V=\text{const}$), вытекающей из продольной щелевой прорези трубы, формирующей плоскую струю (от оси вращения к периферии).

С целью получения правильной геометрической формы плоской жидкостной струи в виде прямоугольника, которая приводит к дальнейшему упрощению

расчетов по аналогии с вентиляторами и повышению эффективности установки, должно быть обеспечено условие:

$$V_{\text{вых.вод.}} = \text{const.}$$

Рассмотрим, как при этом изменяется диаметр $D_{\text{тр.}}$ трубы с продольной щелевой прорезью по ее длине l .

Очевидно, что при вытекании воды из прорези трубы элементарный объемный расход определяется как

$$- \delta V_{\text{вых.вод.}} dl,$$

где δ - ширина продольной прорези на трубе, m ; $V_{\text{вых.вод.}}$ - скорость вытекания воды (струи), m/c ; dl - элементарная длина трубы с прорезью, m .

Тогда изменение объемного расхода воды в трубе составит (рис.4)

$$V_{\text{вых.Тр.}} 2\pi r \cdot dr,$$

где

$$V_{\text{вод.Тр.}} = V_{\text{вод.Тр.о}} = \text{const},$$

и определится как

$$V_{\text{вод.Тр.о}} = \frac{Q}{\frac{\pi D_{\text{Тр.о}}^2}{4} \rho_{\text{вод.}}},$$

где Q - массовый расход воды в трубе, $кг/с$; $D_{\text{Тр.о.}}$ - начальный диаметр трубы с прорезью при $l=0$, m ; $\rho_{\text{вод.}}$ - плотность воды, $кг/м^3$; $V_{\text{вод.Тр.о.}}$ - скорость воды в трубе в ее начальном сечении, m/c ; $V_{\text{вод.Тр.}}$ - скорость воды в произвольном сечении, m/c .

Таким образом, по закону сохранения массы (вода несжимаема) можно записать

$$2\pi \cdot r \cdot V_{\text{вод.Тр.о}} \cdot dr = - \delta \cdot V_{\text{вых.вод.}} \cdot dl, \quad (7)$$

$$\frac{r^2}{2} \Big|_{r_0}^r = - \frac{\delta V_{\text{вых.вод.}} l}{2\pi V_{\text{вод.Тр.о}}} \Big|_0^l$$

откуда

$$D_{\text{Тр.и.}} = 4 \sqrt{r_0^2 - \frac{\delta V_{\text{вых.вод.}} l}{\pi V_{\text{вод.Тр.о}}}}. \quad (8)$$

На рис. 3 приводится график $D_i = (l)$.

Подставляя величины $V_{\text{вых.вод.}}$ и $V_{\text{вод.Тр.о}}$ в (8), получим выражение для определения зависимости текущего диаметра трубы от ее длины:

$$D_{\text{Тр.и.}} = D_{\text{Тр.о}} \sqrt{1 - \frac{\delta(10,3 - 5,84l)l\rho}{4Q}}. \quad (9)$$

Для реализации данного уравнения предусмотрен вращающийся осевой контактный теплообменник с начальным диаметром $D_{\text{Тр.о}}=0,041$ m .

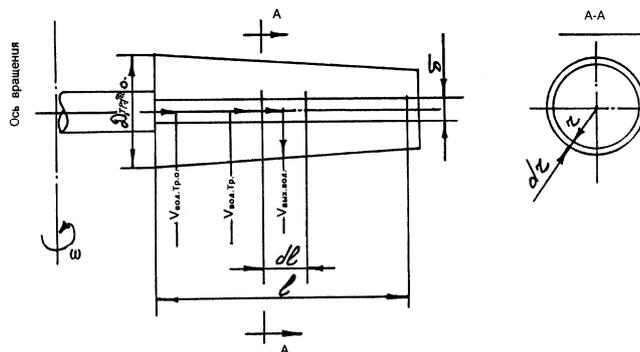


Рис. 4. Изменение диаметра трубы, образующей плоскожидкостную струю при постоянной скорости воды ($Y_{\text{вых.вод.}}$) по всей длине щелевой прорези от оси вращения к периферии

Для рассматриваемого теплообменника с начальным диаметром $D_{\text{гр.0}} = 0,041$ м, толщиной щелевой прорези $\delta = 1$ мм, с учетом $Q = 1,7$ кг/с, при длине $l = 0,6$ м диаметр трубы составляет $D_{\text{гр.1}} = 25,9$ мм.

Учитывая, что погрешность составляет не более 3%, уравнение (9) рекомендуется для практических расчетов при конструировании теплообменных аппаратов приведенного типа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Александрян К.В., Ханоян Р.Г.** Контактный теплообменник. А.с. СССР N1206597.
2. **Михеев М. А.** Основы теплопередачи. 2-е изд. - М.-Л.: Машиностроение, 1949. - 396 с.
3. **Жуковский Н.Е.** Видоизменение метода Кирхгоффа для определения движения жидкости в двух измерениях: Избранные сочинения. Т.1. М. - Л.: Гостехиздат, 1948. - 392 с.

НПО "Сельхозмеханизация" Мин пром-ти РА. Материал поступил в редакцию 06.12.2001.

Կ.Վ. ԱԼԵՔՍԱՆԴՐՅԱՆ, Ռ.Գ. ԽԱՆՈՅԱՆ

**ԱՌԱՆՅՔԱՅԻՆ ՊՏՏՎՈՂ ՀՊՈՒՄԱՅԻՆ ՋԵՐՄԱՓՈԽԱՆԱԿՉԻ
ՀԱՐԹ ՋՐԱՇԻԹԱՅԻՆ ԹԵՎԵՐԻ ՈՒՂՂԱՆԿՅԱՆ ՏԵՍՔՈՎ
ԿԱԶՄԱՎՈՐՄԱՆ ՊԱՅՄԱՆԻ ՄԱՀՄԱՆՈՒՄԸ**

Ստացված է առանցքային օդամղիչի ուղղանկյուն թևի տեսք ունեցող, հարթ ջրաշիթեր ձևավորող հորիզոնական հարթության մեջ պտտվող խողովակի ընդերկայնական ճեղքվածքային կտրվածքից դուրս ցայտող ջրի հաստատուն արագության պայմանը բնորոշող հավասարումը:

K.V. ALEXANDRYAN, R.G. KHANOYAN

**CONDITION FORMING DEFINITION FOR FLAT LIQUID RECTANGULAR
ROTATION AXLE CONTACT HEAT EXCHANGER**

An equation determining the speed constancy of water running from longitudinal slit (from the axle – tree rotation to the peripheral) is obtained. This slit rotates in horizontal plane of the pipe forming a flat liquid stream in the form of a rectangular axle – tree of the ventilator.

В.С. ХАЧАТРЯН, М.Г. ТАМРАЗЯН, Д.Э. САРКИСЯН

МЕТОД ОПТИМИЗАЦИИ СТРУКТУРЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

Предлагается метод оптимизации структуры электрической сети. Рассматривается случай, когда заранее решены задачи размещения электрических станций и нагрузок.

Ключевые слова: граф, мощность, узел, режим, поток, модель, нагрузка, электрическая сеть, элемент.

Задача оптимизации структуры электрической сети возникает в случае, когда известны размещения и режимы работы электрических станций, а также величины нагрузок потребителей [1-6]. Предположим, имеется $\Gamma+1$ стационарных и N нагрузочных узлов, так что, если общее число исследуемой электрической сети обозначить через M , то оно определится как $M=\Gamma+1+N$.

Если соединить все стационарные и нагрузочные узлы, то получим полный граф с $\Gamma+N+1$ вершинами и $1/2(\Gamma+N+1)(\Gamma+N)=1/2M(M-1)$ ребрами. Каждому ребру полного графа соответствует возможная линия электропередачи с затратами [3]:

$$F_{\text{лэп}(ij)} = a_{ij} + b_{ij}P_{ij}, \quad (1)$$

где a_{ij} - постоянная составляющая приведенных затрат, зависящая от длины линий электропередач (ЛЭП), ее напряжения и ряда других факторов; $b_{ij} P_{ij}$ - переменная составляющая приведенных затрат, зависящая от режима работы электрической сети и характеризуемая передаваемой мощностью P_{ij} ; b_{ij} - коэффициент пропорциональности между частью затрат, зависящий от величины потока мощности.

Как правило, численные значения коэффициентов a_{ij} и b_{ij} находятся в следующем соотношении:

$$a_{ij} \gg b_{ij}. \quad (2)$$

Выражение (1) написано для вновь строящейся линии электропередач. Для существующей линии в (1) отсутствует первое слагаемое. Для произвольного варианта вновь строящейся электрической сети выражение (1) принимает вид

$$F = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M a_{ij} + \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M b_{ij}P_{ij} \quad (3)$$

и является функцией суммарных приведенных затрат.

Функция (3) является целевой при оптимизации развития электрической сети, которую необходимо минимизировать.

Для построения полной математической модели оптимизации развития вновь проектируемой электрической сети необходимо добавить также первый закон

Кирхгофа относительно потоков активной мощности и условия неотрицательности искомым переменных. В результате получим

$$\min F = \min \left(\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M a_{ij} + \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M b_{ij} P_{ij} \right); \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^M P_{ij} = P_i; \quad i = \overrightarrow{1, M}; \quad (5)$$

$$P_{ij} \geq 0 \quad i, j = \overrightarrow{1, M}. \quad (6)$$

Представим линейную целевую функцию (4) в виде суммы двух слагаемых:

$$F_1 = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M a_{ij}; \quad (7)$$

$$F_2 = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M b_{ij} P_{ij}. \quad (8)$$

При этом имеем

$$F_1 > F_2. \quad (9)$$

Из (7) и (8) можно заметить, что функция F_1 , в отличие от F_2 , не зависит от передаваемых мощностей P_{ij} .

Учитывая линейность математической модели (4)-(6), ее можно представить как совокупность двух линейных математических моделей:

$$\min F_1 = \min \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M a_{ij} \quad (10)$$

и

$$\min F_2 = \min \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M b_{ij} P_{ij}; \quad (11)$$

$$\sum_{j=1}^M P_{ij} = P_i, \quad i = \overrightarrow{1, M}; \quad (12)$$

$$P_{ij} \geq 0; \quad i, j = \overrightarrow{1, M}. \quad (13)$$

В данном случае (10) является математической моделью "Кратчайшей связывающей сети – КСС", тогда как (11)-(13) математической моделью транспортной задачи линейного программирования.

Поскольку имеют место соотношения (2) и (9), то структура искомой оптимальной электрической сети будет характеризоваться решением задачи (10). Задача (11)-(13) осуществляет роль коррекции решенной задачи (10).

Если полный граф задачи (10) обозначить через Γ_1 , то соответствующее оптимальное решение, являясь одним из допустимых деревьев этого графа, имеет вид

$$D_{\text{опт},1} \in \Gamma_1. \quad (14)$$

С другой стороны, если через Γ_2 обозначить не полный граф задачи (11)-(13), а оптимальное решение – D_2 , то будем иметь

$$D_{\text{опт},2} \in \Gamma_2. \quad (15)$$

Фактически имеем два оптимальных решения, т.е. два оптимальных дерева, пересечениями которых определяется

$$D_{\text{опт}} = D_{\text{опт},1} \cap D_{\text{опт},2}. \quad (16)$$

Таким образом, предложенный новый метод основывается на пересечении двух оптимальных деревьев.

Как было сказано выше, оптимальная структура исследуемой сети в основном определяется решением $D_{\text{опт},1}$.

После получения оптимальной структуры электрической сети важным является вопрос обеспечения надежного электрообеспечения определенным потребителям. В связи с этим дается понятие также о дополнительном дереве или ветви, которое обозначается $D_{\text{доп}}$, и предлагается их выбирать из состава $D_{\text{опт},2}$:

$$D_{\text{доп}} \in D_{\text{опт},2}. \quad (17)$$

В результате искомая сеть оптимальной структуры определяется на основании следующего выражения:

$$D_{\text{опт}} = D_{\text{опт},1} \cap D_{\text{опт},2} \cap D_{\text{доп}}. \quad (18)$$

Структура дерева $D_{\text{доп}}$ устанавливается персоналом, исходя из критериев надежности электроснабжения с учетом категорий потребителей.

Настоящая работа посвящена решению основной задачи, т.е. (10), которая является задачей "Кратчайшей связывающей сети".

Математическая модель (10) реализуется методом Прима [6], который основывается на двух основных понятиях.

Изолированный полюс (узел) - это полюс (узел), который на данном этапе построения еще не связан с другими полюсами (узлами). Фрагмент есть подмножество полюсов (узлов), связанных прямыми звеньями.

Для построения "Кратчайшей связывающей сети" функционируют следующие два правила:

Правило 1.(П1). Всякий изолированный полюс (узел) соединяется с ближайшим соседом.

Правило 2.(П2). Всякий изолированный фрагмент соединяется с ближайшим соседом кратчайшим звеном.

Ближайшим соседом полюса (узла) является полюс (узел), который находится от данного полюса на расстоянии не больше, чем любой другой полюс (узел). Ближайшим соседом фрагмента является полюс (узел), который находится от данного фрагмента на расстоянии не больше, чем любой другой полюс (узел).

Вышеприведенные правила основываются на двух необходимых условиях:

Необходимое условие 1 (НУ 1). Каждый полюс (узел) в "Кратчайшей связывающей сети" непосредственно связан по крайней мере с одним ближайшим соседом.

Необходимое условие 2 (НУ 2). Каждый фрагмент в "Кратчайшей связывающей сети" связан по крайней мере с одним ближайшим соседом кратчайшим звеном.

Необходимое условие 1 обосновывает справедливость П 1, а необходимое условие 2 - П 2. В связи с этим следует отметить, что необходимое условие 1 обеспечивает построение "Кратчайшей связывающей сети" на основании П 1. Необходимое условие 2 обеспечивает построение "Кратчайшей связывающей сети" на основании П 2.

Алгоритм построения "Кратчайшей связывающей сети". Полный граф с N вершинами имеет $1/2N(N-1)$ ребер. Исходной при построении "Кратчайшей связывающей сети" является таблица расстояний (табл. 1).

Таблица 1

Расстояние между вершинами

	1	2	3	4	5		N
1	0	a_{12}	a_{13}	a_{14}	a_{15}	•	a_{1N}
2	a_{21}	0	a_{23}	a_{24}	a_{25}	•	a_{2N}
3	a_{31}	a_{32}	0	a_{34}	a_{35}	•	a_{3N}
4	a_{41}	a_{42}	a_{43}	0	a_{45}	•	a_{4N}
5	a_{51}	a_{52}	a_{53}	a_{54}	0	•	a_{5N}
	•	•	•	•	•	•	•
N	a_{N1}	a_{N2}	a_{N3}	a_{N4}	a_{N5}	•	0

Алгоритм построения "Кратчайшей связывающей сети" основывается на одновременном использовании положений теорем 1 и 2.

В настоящей работе предлагается алгебраический метод алгоритма, сущность которого заключается в том, что положения П 1 используются всего лишь один раз для построения единственного изолированного фрагмента, затем, используя положения П 2, завершается построение "Кратчайшей связывающей сети".

Сущность алгоритма заключается в следующем:

1. Из табл. 1 выбирается первая строка и представляется в виде F'_1 :

$$F'_1 = \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|} \hline & 2 & 3 & 4 & 5 & N \\ \hline a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} & \bullet & a_{1N} \\ \hline (1) & (1) & (1) & (1) & & (1) \\ \hline \end{array} . \quad (19)$$

В (19) цифры в скобках показывают номер рассматриваемой строки, верхние цифры - номера столбцов, средние цифры - численные значения a_{ij} .

Из F'_1 выбирается наименьшее число, предположим, a_{13} , т.е. число, которое находится в пересечении координат 1 и 3. Число a_{13} удаляется из (19) и заносится в итоговую табл. 2. В результате F'_1 принимает вид

$$F'_1 = \begin{array}{|c|c|c|c|c|} \hline & 2 & 4 & 5 & N \\ \hline a_{12} & a_{14} & a_{15} & \bullet & a_{1N} \\ \hline (1) & (1) & (1) & & (1) \\ \hline \end{array} . \quad (20)$$

Число a_{13} фигурирует только в третьей строке табл. 1, и данная строка получается по направлению F'_1 с правой стороны в виде F''_1 , но без этого числа:

$$F''_1 = \begin{array}{|c|c|c|c|c|} \hline & 2 & 4 & 5 & N \\ \hline a_{32} & a_{34} & a_{35} & \bullet & a_{3N} \\ \hline (3) & (3) & (3) & & (3) \\ \hline \end{array} . \quad (21)$$

Сравнивая соответствующие числа F''_1 по (21) и F'_1 по (20), т.е. a_{32} и a_{12} , a_{34} и a_{14} , a_{35} и a_{15} , ..., a_{3N} и a_{1N} , строится новая строка, в клетках которой помещаются меньшие числа.

Предположим, $a_{32} < a_{12}$, $a_{34} < a_{14}$, $a_{35} > a_{15}$, ... , $a_{3N} > a_{1N}$, тогда вышеуказанная строка обозначается F'_2 и принимает вид

$$F'_2 = \begin{array}{|c|c|c|c|c|} \hline & 2 & 4 & 5 & N \\ \hline a_{32} & a_{34} & a_{15} & \bullet & a_{1N} \\ \hline (3) & (3) & (1) & & (1) \\ \hline \end{array} . \quad (22)$$

Анализируя (22), выбирается наименьшее число, предположим, a_{34} , т.е. число пересечения координат 3-4. Указанное число удаляется из (22) и заносится в результирующую табл. 2. В результате (22) принимает вид

$$F'_2 = \begin{array}{|c|c|c|c|} \hline & 2 & 5 & N \\ \hline a_{32} & a_{15} & \bullet & a_{1N} \\ \hline (3) & (1) & & (1) \\ \hline \end{array} . \quad (23)$$

Наименьшее число a_{34} фигурирует в четвертой строке табл. 1, и данная строка помещается по направлению F'_2 также с правой стороны в виде F''_2 , но без числа a_{34} :

$$F''_2 = \begin{array}{|c|c|c|c|} \hline & 2 & 5 & N \\ \hline a_{42} & a_{45} & \bullet & a_{4N} \\ \hline & & & \\ \hline \end{array} . \quad (24)$$

Затем сравниваются соответствующие числа a_{42} и a_{32} , a_{45} и a_{15} , ..., a_{4N} и a_{1N} и в результате строится новая строка в виде F'_3 , в которую помещаются наименьшие числа:

$$F'_3 = \begin{array}{|c|c|c|c|} \hline & 2 & 5 & N \\ \hline a_{32} & a_{45} & \bullet & a_{4N} \\ \hline (3) & (5) & & \\ \hline \end{array} . \quad (25)$$

Приведенная строка (25) показывает, что в результате сравнения было установлено, что $a_{42} > a_{32}$, $a_{45} < a_{15}$, ..., $a_{4N} < a_{1N}$.

Выбирается наименьшее число из (25), предположим, a_{45} , которое исключается из (25) и помещается в результирующую табл. 2. В результате строка (25) принимает вид

$$F'_4 = \begin{array}{|c|c|c|} \hline & 2 & N \\ \hline a_{32} & \bullet & a_{4N} \\ \hline (3) & & \\ \hline \end{array} . \quad (26)$$

Аналогичным образом продолжают следующие шаги, и на последнем этапе остается одно число, предположим

$$F'_4 = \begin{array}{|c|} \hline \ell \\ \hline a_{\ell N} \\ \hline (N) \\ \hline \end{array} , \quad (27)$$

которое также включается в результирующую табл. 2.

В (27) ℓ - номер соответствующего столбца, по направлению которого находится наименьшее число.

Таблица 2

Результативная таблица

Ветвь оптимального дерева	1-3	3-4	4-5	...	$\ell - N$
a_{ij}	a_{31}	a_{34}	a_{45}	...	$a_{\ell N}$

Следует отметить, что второй индекс предпоследнего нижнего элемента в табл. 2 должен быть " ℓ ".

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хачатрян В.С., Темурдзян А.В. Оптимизация структуры объединенной электрической системы с применением метода декомпозиции //Электричество.- 1983.- № 8.- С.8-13.
2. Салливан Р.Л. Проектирование развития электроэнергетических систем.-М.: Энергоиздат, 1982.-358с.
3. Маркович И.М., Шарнольский Б.П. Об одной возможности использования обобщенной транспортной задачи для определения оптимальной электрической сети // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт.-1967.-№ 5.- С.56-59.
4. Лазебник А.И. Применение методов ветвей и границ для выбора оптимальной электрической сети // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт.-1969.- № 2.- С.138-144.
5. Арзамасцев Д.А., Липес А.В., Мызин А.Л. Модели оптимизации развития энергосистем.-М.: Высшая школа.-1987.-272с.
6. Прим Р.К. Кратчайшие связывающие сети и некоторые обобщения // Кибернетический сборник. - М.: Издательство иностранной литературы.- 1961.-С.42-51.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 2.08.2000.

Վ.Ս. ԽԱՉԱՏՐՅԱՆ, Մ.Գ. ԹԱՄՐԱԶՅԱՆ, Դ.Է. ՍԱՐԳՍՅԱՆ

ԷԼԵԿՏՐԱԿԱՆ ՑԱՆՑԻ ԿԱՌՈՒՑՎԱԾՔԻ ՕՊՏԻՄԱԼԱՑՄԱՆ ՄԵԹՈԴ

Առաջարկվում է էլեկտրական ցանցի կառուցվածքի օպտիմալացման մեթոդ: Դիտարկվում է այն դեպքը, երբ նախօրոք լուծված են էլեկտրական ցանցերի և բեռների տեղակայման խնդիրները:

V.S. KHACHATRYAN, M.G. TAMRAZYAN D.E. SARKISSYAN

ELECTRIC NETWORK STRUCTURE OPTIMIZATION METHOD

A new method of electric network structure optimization is proposed. A case is considered when problems are solved before hand for electric station and loading arrangement.

А.Г. АРУТЮНЯН

ЭФФЕКТИВНЫЙ СПОСОБ ПИТАНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ И НАРУЖНОЙ ОСВЕТИТЕЛЬНОЙ СЕТИ

Рассматривается новый принцип построения осветительных сетей производственного и наружного освещения с частотой питающего напряжения $f=400$ Гц для ламп ДРЛ, который улучшает эксплуатационные характеристики как ламп ДРЛ, так и электрической сети освещения. Предлагается методика для выбора мощности преобразующих устройств.

Ключевые слова: искусственное освещение, газоразрядная лампа, коэффициент пульсации, преобразователь частоты.

В настоящее время трудно найти трудовой процесс, где не нужно, хотя бы частично, напрягать органы зрения. Однако есть профессии, которые предъявляют особо высокие требования к функциям глаза. Такие профессии встречаются в легкой промышленности, ювелирном, алмазном и других производствах. Эти и подобные работы вызывают утомление органов зрения, которое ускоряется при плохом искусственном освещении и проявляется у работников в виде неприятных ощущений, а также может влиять на развитие близорукости. В таких условиях повышается опасность производственного травматизма.

Как показали результаты многих исследований, проведенных гигиенистами, светотехниками и экономистами, создание эффективных условий освещения в промышленности обеспечивает повышение производительности труда [1].

На промышленных предприятиях около 10% потребляемой электроэнергии затрачивается на искусственное электрическое освещение [2], правильное выполнение которого способствует рациональному использованию электроэнергии, улучшению качества выпускаемой продукции, повышению производительности труда, уменьшению случаев аварии и травматизма.

В [3] для освещения производственных помещений при выполнении зрительных работ первого разряда предусматривается комбинированное освещение $E=1500...5000$ лк, из них общее освещение должно обеспечить $E=400...1500$ лк. Однако этого практически невозможно достичь с помощью источников света, которые допущены для освещения производственных помещений. Например, по данным 1988г., на Донецком хлопчатобумажном комбинате удалось обеспечить общую освещенность $E=600$ лк люминесцентными лампами $P_n=80$ Вт.

Обеспечение уровня общей освещенности по требованиям [3] в настоящее время возможно мощными источниками света (ДРЛ, ДРИ и др.), что подтверждается и технико-экономическим сравнением ламп ДРЛ с люминесцентными лампами. Лампы ДРЛ являются более экономичными, так как при их использовании число светильников значительно сокращается, что приводит к уменьшению

эксплуатационных затрат [4]. Однако новые мощные источники света имеют ряд недостатков, что не позволяет их внедрение для производственного освещения при высоких и средних разрядах зрительных работ [3] (рис.1а).

Общим недостатком всех газоразрядных ламп (Гл) высокого давления является большой коэффициент пульсации ($K_p=65\%$) и плохая цветопередача. Вопросы цветопередачи в настоящее время частично решены: лампы ДРЛ с улучшенной цветопередачей допущены для освещения промышленных предприятий [4]. Известно [2], что величина пульсации освещенности для производственных помещений нормируется, поэтому для уменьшения пульсации освещенности до допустимых значений в [3] рекомендуются два пути: а) чередование фаз; б) питание газоразрядных ламп переменным напряжением повышенной частоты до 400 Гц. При питании Гл высокого давления повышенной частоты коэффициент пульсации уменьшается до 30%, а светоотдача и срок службы ламп увеличиваются в среднем до 10% [5]. Однако до настоящего времени питание Гл напряжением повышенной частоты не применяется для производственного освещения, так как существующие электрические схемы (рис.1б) [6] улучшают эксплуатационные показатели Гл, но не уменьшают коэффициент пульсации Гл высокого давления до допустимых величин для зрительных работ первого и второго разрядов. В то же время показатели электрической сети освещения серьезно уступают ныне применяемым показателям промышленной частоты (рис.1а). Схемы на рис.1б сложны в эксплуатации и требуют высоких эксплуатационных затрат.

В настоящей статье предлагается принципиально новая структурная схема питания осветительной сети (рис.1в) [7], где одновременно сочетается повышение эксплуатационных характеристик Гл и энергетических показателей сетей освещения. Наши эксперименты показали, что при питании Гл типа ДРЛ - 400 по предложенной схеме коэффициент пульсации уменьшается до 3%, что ниже требуемых существующих норм [3].

Уменьшение величины пульсации светового потока лампы достигается благодаря питанию лампы однополярным импульсным напряжением с частотой $f=400$ Гц или $T=2,5$ мс. Длительность импульса и паузы выбрана равной $t_i=t_p=1,25$ мс. Во время паузы энергия дросселя передается на лампу, в результате ток через лампу проходит в течение всего периода импульсного напряжения. Расчеты показывают, что ток через лампу в конце полупериода паузы уменьшается до 75% от его номинального значения.

Для подтверждения эффективности предложенной осветительной сети (рис.1в [7]) было проведено технико-экономическое сравнение между существующими (рис.1а) и предложенной (рис.1б) осветительными сетями. В технико-экономическом сравнении были учтены следующие изменения капитальных и эксплуатационных затрат: стоимость преобразующих устройств; стоимость светильников; ежегодные затраты на эксплуатацию светильников; потери электроэнергии в осветительных сетях.

Технико-экономическое сравнение проводилось по ценам 1988г. в рублях (см. табл.).

Годовой эконом. эффект сравниваемого варианта, $\Delta \text{Э}, \text{руб/год}$	Мощность осветительной сети или преобразователя частоты $P_n, \text{кВт}$				
	5	10	15	20	25
$\Delta \text{Э}$ при сравнении с освет. сетью промышленной частоты (рис. 1а)	100	200	300	400	500
$\Delta \text{Э}$ при сравнении с освет. сетью $f=400 \text{ Гц}$ переменным напряже- нием (рис. 1б)	87	175	246	350	440

Преимуществами схемы рис.1в являются: низкие капитальные и эксплуатационные затраты, что обусловлено в том числе уменьшением потерь электроэнергии в осветительных сетях из-за отсутствия поверхностного эффекта [9]. Увеличение производительности труда при технико-экономическом сравнении не учитывалось.

Исследованиями доказано, что рациональной частотой для производственного освещения является $f=400 \text{ Гц}$ [10].

Однако до настоящего времени нет методики технико-экономического обоснования выбора рациональной мощности преобразующих устройств при питании Гл напряжением с частотой $f = 400 \text{ Гц}$.

Как видно из приведенной таблицы, с увеличением мощности преобразующих устройств экономический эффект от перевода производственного освещения на повышенную частоту увеличивается. Однако чрезмерное увеличение мощности одного преобразующего устройства недопустимо, так как выход из строя последнего приводит к неравномерности освещения. Известно [3], что величина допустимой неравномерности производственного освещения ограничивается существующими нормами в пределах 1,5...3 и зависит от точности работ и вида светильника.

Исходя из вышеизложенного, предлагается максимальную мощность одного преобразующего устройства для каждого разряда зрительной работы определять в зависимости от допустимой неравномерности освещения. Преимуществом производственного освещения по структурной схеме, приведенной на рис.1в, является то, что выбор мощности преобразующих устройств сводится к выбору мощности выпрямителя постоянного напряжения, от которого будут питаться индивидуальные преобразователи частоты, мощность которых можно выбирать в соответствии со стандартом выпускаемых газоразрядных ламп высокого давления. В случае схемы рис.1б необходимо изменить мощность инвертора, что приведет к подорожанию преобразующих устройств и увеличению эксплуатационных затрат на него.

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

1. Разделение инвертора от преобразователя постоянного напряжения позволяет осветительную сеть выполнить на постоянном напряжении и производить инверторы в соответствии со стандартными мощностями газоразрядных ламп высокого давления.
2. Включение и отключение осветительной сети при проектировании по [7] возможно без коммутации силовых электрических цепей.

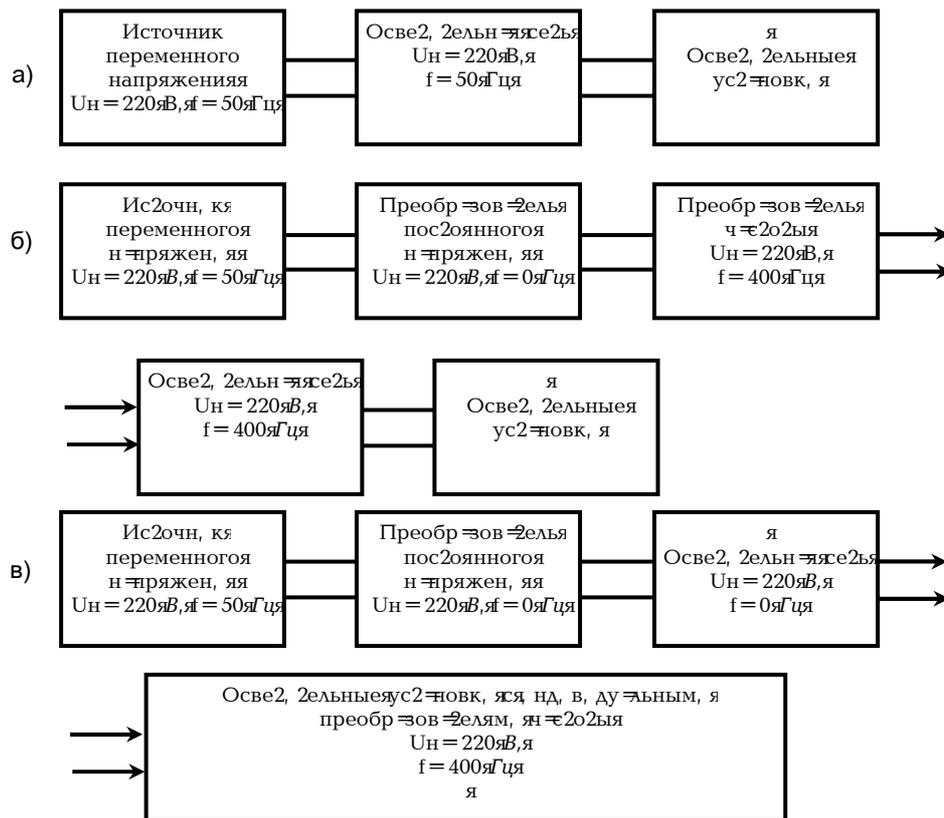


Рис. Блок-схемы сравниваемых вариантов

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Айзенберг Ю.Б. Справочная книга по светотехнике. - М.: Энергоатомиздат, 1983. - 472 с.
2. Федоров А.А., Старкова Л.Е. Учебное пособие для курсового и дипломного проектирования по электроснабжению промышленных предприятий. - М.: Энергоатомиздат, 1987. - 368 с.
3. СНиП 11-4-79. Естественное и искусственное освещение. Нормы проектирования.
4. Кнорринг Г.М. Осветительные установки. - Л.: Энергоиздат, Ленингр. отд-ние, 1981. - 288 с.
5. Фугенфиров М.М. Электрические схемы с газоразрядными лампами. - М.: Энергия, 1974. - 368 с.
6. Лабунцов В.А. и др. Полупроводниковый преобразователь частоты для питания люминесцентных ламп // Труды МЭИ. - 1965. - Вып.55. - С. 3 - 14.

7. Изобретение NP20000027 (P.A.). Устройство для группового питания газоразрядных ламп высокого давления импульсным напряжением **А.Г. Арутюнян** 14.04.2000. Официальный справочник N1, г.Ереван.
8. ELECTRONIC BALLAST FOR HIGH INTENSITY DISCHARGE LAMPS (HID). *** J.B.P.TECHNOLOGIES LTD. [http:// WWW. incubators. org. il/18016. htm](http://WWW.incubators.org.il/18016.htm).
9. **Атабеков Г.И., Купалян С.Д., Тимофеев А.В., Хухрикова С.С.** Теоретические основы электротехники. - М.: Энергия, 1979. - 432 с.
10. **Арутюнян А.Г., Шиян А.Л.** Выбор рациональной частоты напряжения питания для люминесцентных ламп // Промышленная энергетика. – 1988. - N8. – С. 8 - 9.

ЗАО "Институт энергетика РА". Материал поступил в редакцию 5.10.2001.

Ա.Գ. ՀԱՐՈՒԹՅՈՒՆՅԱՆ

ԱՐՏԱԴՐԱԿԱՆ ԵՎ ԱՐՏԱՔԻՆ ԼՈՒՍԱՎՈՐՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆՑԵՐԻ ՄՆՄԱՆ ԱՐԴՅՈՒՆԱՎԵՏ ԵՂԱՆԱԿ

Դիտարկվում է արտադրական և արտաքին լուսավորության էլեկտրական ցանցերի կառուցման նոր սկզբունք սնող լարման $f=400\text{Հց}$ հաճախականությամբ գազապարպման ԺՀԽ լամպերի համար, որը նպաստում է և՛ ԺՀԽ լամպերի, և՛ լուսավորության էլեկտրական ցանցի շահագործման բնութագրերի բարելավմանը: Առաջարկվում է կերպափոխիչ սարքավորումների հզորության ընտրության մեթոդիկա:

A.G. HARUTIUNYAN

EFFICIENT WAY OF SUPPLYING INDUSTRIAL AND OUTDOOR LIGHTING

A new lighting grid construction principle for industrial and outdoor lighting system with supply voltage frequency of $f = 400\text{ Hz}$ for arc discharge lamps is considered. This principle improves the maintenance characteristics of both arc discharge lamps and electric network of lighting. A technique for choosing the capacity of converting devices is suggested.

К.В. ХАЧАТРЯН, А.В. БОРОЯН

КОРРЕКЦИЯ УСТАНОВИВШЕГОСЯ РЕЖИМА ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПРИ P-U И P-Q ТИПАХ СТАНЦИОННЫХ УЗЛОВ

Предлагается метод коррекции установившегося режима ЭЭС при P-U и P-Q типах станционных узлов. Строится соответствующая математическая модель и предлагается метод ее реализации.

Ключевые слова: метод, модель, матрица, система, режим, коррекция, станция, мощность, узел, уравнение.

Как известно, задача расчета установившегося режима электроэнергетической системы (ЭЭС), с математической точки зрения, сводится к решению систем нелинейных алгебраических уравнений, которое осуществляется итерационным методом, требующим большого объема вычислительных работ [1-7]. Любое изменение относительно исходной информации порождает расчет нового установившегося режима, т.е. решение систем нелинейных алгебраических уравнений. Поэтому коррекция установившегося режима является актуальным вопросом.

В настоящей работе при решении задачи коррекции установившегося режима ЭЭС рассматривается случай, когда станционные узлы одновременно могут быть как типа P-Q, так и типа P-U.

Пассивная часть исследуемой ЭЭС задается в Y-Z форме, которую удобнее представить в следующем виде [6]:

$$\begin{bmatrix} \underline{Y}_{m,n} & | & \underline{Y}_{m,\ell} & | & \underline{\dot{A}}_{m,j} \\ \underline{Y}_{k,n} & | & \underline{Y}_{k,\ell} & | & \underline{\dot{A}}_{k,j} \\ \underline{\dot{B}}_{i,n} & | & \underline{\dot{B}}_{i,\ell} & | & \underline{\dot{Z}}_{m,j} \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Для построения соответствующих систем нелинейных алгебраических уравнений принимается та же система индексов, что и в [6]. При этом:

$$\begin{cases} \Phi_{pm} = P_m - [P_{Bm} + \varphi_{pm}(U_n, \Psi_{Un}; U_\ell, \Psi_{U\ell})] = 0, \\ \Phi_{qm} = Q_m - [Q_{Bm} + \varphi_{qm}(U_n, \Psi_{Un}; U_\ell, \Psi_{U\ell})] = 0; \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \Phi_{pk} = P_k - [P_{Bk} + \varphi_{pk}(U_n, \Psi_{Un}; U_\ell, \Psi_{U\ell})] = 0, \\ \Phi_{qk} = Q_k - [Q_{Bk} + \varphi_{qk}(U_n, \Psi_{Un}; U_\ell, \Psi_{U\ell})] = 0; \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \Phi_{pi} = P_i - [P_{\dot{A}i} + \varphi_{pi}(I'_j, I''_j)] = 0, \\ \Phi_{qi} = Q_i - [Q_{\dot{A}i} + \varphi_{qi}(I'_j, I''_j)] = 0. \end{cases} \quad (4)$$

В раскрытой форме выражения $\Phi_{pm}, \Phi_{qm}; \Phi_{pk}, \Phi_{qk}$ и Φ_{pi}, Φ_{qi} приводятся в [7] в виде уравнений (10)-(15) и (16)-(22).

Представим системы уравнений (2)-(4) в виде следующих неявных функций:

$$\begin{cases} \Phi_{pm}(U_n, \Psi_{Un}; U_\ell, \Psi_{U\ell}) = 0, \\ \Phi_{qm}(U_n, \Psi_{Un}; U_\ell, \Psi_{U\ell}) = 0; \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} \Phi_{pk}(U_n, \Psi_{Un}; U_\ell, \Psi_{U\ell}) = 0, \\ \Phi_{qk}(U_n, \Psi_{Un}; U_\ell, \Psi_{U\ell}) = 0; \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} \Phi_{pi}(I'_j, I''_j) = 0, \\ \Phi_{qi}(I'_j, I''_j) = 0. \end{cases} \quad (7)$$

Для определения реактивных мощностей станционных узлов типа P-U с индексами $k(\ell)$ достаточно иметь только аргументы комплексных напряжений. В силу этого системы уравнений (5) и (6) можно представить в виде

$$\begin{cases} \Phi_{pm}(U_n, \Psi_{Un}; \Psi_{U\ell}) = 0, \\ \Phi_{qm}(U_n, \Psi_{Un}; \Psi_{U\ell}) = 0, \\ \Phi_{pk}(U_n, \Psi_{Un}; \Psi_{U\ell}) = 0. \end{cases} \quad (8)$$

Системы уравнений (7), которые написаны относительно нагрузочных узлов с индексами $i(j)$, остаются неизменными. Полученные системы нелинейных алгебраических уравнений установившегося режима ЭЭС (8) и (7) решаются методами первого порядка и Ньютона-Рафсона. Рекуррентное выражение для решения систем нелинейных алгебраических уравнений (8) имеет вид

$$\begin{bmatrix} \frac{U_n}{\Psi_{Un}} \\ \Psi_{U\ell} \end{bmatrix}^{И+1} = \begin{bmatrix} \frac{U_n}{\Psi_{Un}} \\ \Psi_{U\ell} \end{bmatrix}^{И} - \begin{bmatrix} \frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial U_n} & \frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial \Psi_{Un}} & \frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial \Psi_{U\ell}} \\ \frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial U_n} & \frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial \Psi_{Un}} & \frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial \Psi_{U\ell}} \\ \frac{\partial \Phi_{pk}}{\partial U_n} & \frac{\partial \Phi_{pk}}{\partial \Psi_{Un}} & \frac{\partial \Phi_{pk}}{\partial \Psi_{U\ell}} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \Phi_{pm} \\ \Phi_{qm} \\ \Phi_{pk} \end{bmatrix}, \quad (9)$$

а для решения (7) -

$$\begin{bmatrix} I'_i \\ \vdots \\ I''_i \end{bmatrix}^{И+1} = \begin{bmatrix} I'_i \\ \vdots \\ I''_i \end{bmatrix}^{И} - \begin{bmatrix} \frac{\partial \Phi_{pi}}{\partial I'_j} & \frac{\partial \Phi_{pi}}{\partial I''_j} \\ \frac{\partial \Phi_{qi}}{\partial I'_j} & \frac{\partial \Phi_{qi}}{\partial I''_j} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Phi_{pi} \\ \Phi_{qi} \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Частные производные матрицы Якоби (9) определяются в следующем виде:

— при одинаковых индексах:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial U_m} &= - \left(\frac{\partial P_{\dot{A}m}}{\partial U_m} + \sum_{n=1}^{\dot{A}'} K_{m,n} U_n + \sum_{\ell=\dot{A}'+1}^{\dot{A}} K_{m,\ell} U_\ell \right); \\ \frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial U_m} &= - \left(\frac{\partial Q_{\dot{A}m}}{\partial U_m} + \sum_{n=1}^{\dot{A}'} N_{m,n} U_n + \sum_{\ell=\dot{A}'+1}^{\dot{A}} N_{m,\ell} U_\ell \right); \\ \frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial \Psi_{Um}} &= - \left[\frac{\partial P_{\dot{A}m}}{\partial \Psi_{Um}} - U_m \left(\sum_{n=1}^{\dot{A}'} N_{m,n} U_n + \sum_{\ell=\dot{A}'+1}^{\dot{A}} N_{m,\ell} U_\ell \right) \right]; \\ \frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial \Psi_{Um}} &= - \left[\frac{\partial Q_{\dot{A}m}}{\partial \Psi_{Um}} + U_m \left(\sum_{n=1}^{\dot{A}'} K_{m,n} U_n + \sum_{\ell=\dot{A}'+1}^{\dot{A}} K_{m,\ell} U_\ell \right) \right]; \\ \frac{\partial \Phi_{pk}}{\partial U_k} &= - \left(\frac{\partial P_{\dot{A}k}}{\partial U_k} + \sum_{n=1}^{\dot{A}'} K_{k,n} U_n + \sum_{\ell=\dot{A}'+1}^{\dot{A}} K_{k,\ell} U_\ell \right); \\ \frac{\partial \Phi_{pk}}{\partial \Psi_{Uk}} &= - \left[\frac{\partial P_{\dot{A}k}}{\partial \Psi_{Uk}} - U_k \left(\sum_{n=1}^{\dot{A}'} N_{k,n} U_n + \sum_{\ell=\dot{A}'+1}^{\dot{A}} N_{k,\ell} U_\ell \right) \right]; \end{aligned} \quad (11)$$

— при разных индексах:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial U_n} &= -U_m K_{m,n}; & \frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial U_n} &= -U_m N_{m,n}; & \frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial \Psi_{Un}} &= -U_m N_{m,n}; \\ \frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial \Psi_{Un}} &= -U_m K_{m,n}; & \frac{\partial \Phi_{pk}}{\partial U_\ell} &= -U_k K_{k,\ell}; & \frac{\partial \Phi_{pk}}{\partial \Psi_{U\ell}} &= -U_k N_{k,\ell}. \end{aligned} \quad (12)$$

В выражениях (11) и (12) приняты следующие обозначения:

$$K_{\alpha,\beta} = g_{\alpha,\beta} \cos(\Psi_{U\alpha} - \Psi_{U\beta}) + b_{\alpha,\beta} \sin(\Psi_{U\alpha} - \Psi_{U\beta}); \quad (13)$$

$$N_{\alpha,\beta} = g_{\alpha,\beta} \sin(\Psi_{U\alpha} - \Psi_{U\beta}) - b_{\alpha,\beta} \cos(\Psi_{U\alpha} - \Psi_{U\beta}). \quad (14)$$

Частные производные $\partial P_{Bm}/\partial U_m$, $\partial Q_{Bm}/\partial U_m$, $\partial P_{Bm}/\partial \Psi_{Um}$, $\partial Q_{Bm}/\partial \Psi_{Um}$, $\partial P_{PK}/\partial U_n$, $\partial P_{PK}/\partial \Psi_{Uk}$, а также производные, входящие в матрицу Якоби рекуррентного выражения (10), определяются соответственно выражениями (42)-(47), а также (51)-(53), приведенными в [6].

В качестве критериев сходимости решения систем нелинейных алгебраических уравнений (7) и (8) соответственно выбираются

$$\begin{aligned} |P_\lambda - (P_{\lambda k} + \phi_{p\lambda})| &\leq \Delta P_\lambda; \\ |Q_\lambda - (P_{\lambda k} + \phi_{p\lambda})| &\leq \Delta Q_\lambda, \end{aligned} \quad (15)$$

где $\lambda = m(n); k(\ell); i(j)$ и $\Delta P_\lambda, \Delta Q_\lambda$ характеризуют точность определения численных значений искоемых режимных параметров.

Как обычно, принимается:

$$\begin{aligned} \Delta P_m = \Delta P_k = \Delta P_\lambda = \Delta P; \\ \Delta Q_m = \Delta Q_k = \Delta Q_\lambda = \Delta Q. \end{aligned} \quad (16)$$

Пользуясь понятиями векторов X, U, W , которые были приняты в [7], можем написать:

$$[X] = \left[\begin{array}{l} \left. \begin{array}{l} P_0 \\ Q_0 \end{array} \right\} \text{ для базисного (балансирующего) станц. узла} \\ \text{типа } U - \Psi_U; \\ \left. \begin{array}{l} U_n \\ \Psi_{U_n} \end{array} \right\} \text{ для независимых станц. узлов типа } P - Q; \\ \left. \begin{array}{l} Q_\ell \\ \Psi_{U_\ell} \end{array} \right\} \text{ для независимых станц. узлов типа } P - U; \\ \left. \begin{array}{l} I'_{Z(Y)} \\ I''_{Z(Y)} \end{array} \right\} \text{ для } Z(Y) \text{ блока систем нелинейных алгебр.} \\ \text{уравнений;} \end{array} \right] \quad (17)$$

$$[U] = \left[\begin{array}{l} \left. \begin{array}{l} U_0 \\ \Psi_{U_0} \end{array} \right\} \text{ для базисного (балансирующего) станц. узла} \\ \text{типа } U - \Psi_U; \\ \left. \begin{array}{l} P \\ Q \end{array} \right\} \text{ для станц. узлов типа } P - Q; \\ \left. \begin{array}{l} P \\ U \end{array} \right\} \text{ для станц. узлов типа } P - U. \end{array} \right] \quad (18)$$

$$[W] = \left[\begin{array}{l} \left. \begin{array}{l} P \\ Q \end{array} \right\} \text{ для нагруз. узлов типа } P - Q \\ \left. \begin{array}{l} I'_{Y(Z)} \\ I''_{Y(Z)} \end{array} \right\} \text{ для } Y(Z) \text{ блока систем нелинейных алгебр.} \\ \text{уравнений} \end{array} \right] \quad (19)$$

В силу этих обозначений системы уравнений (8) и (7) соответственно можно представить в следующем виде:

$$\Phi_{Y(Z)}(X, U; W) = 0; \quad (20)$$

$$\Phi_{Z(Y)}(X, U; W) = 0. \quad (21)$$

При соответствующих приращениях векторные уравнения (20) и (21) можно представить в виде

$$\Phi_{Y(Z)}(X^P + \Delta X, U^0 + \Delta U; W^0 + \Delta W) = 0; \quad (22)$$

$$\Phi_{Z(Y)}(X^P + \Delta X, U^0 + \Delta U; W^0 + \Delta W) = 0, \quad (23)$$

где X^P - вектор состояния в точке решения; U^0, W^0 - заданные значения векторов управления и возмущения.

Разлагая (22) и (23) в ряд Тейлора и пренебрегая частными производными второго порядка и выше, получим следующие выражения:

$$\Delta X_{Y(Z)} = S_{Y(Z)}^U \Delta U_{Y(Z)} + S_{Y(Z)}^W \Delta W_{Y(Z)}; \quad (24)$$

$$\Delta X_{Z(Y)} = S_{Z(Y)}^U \Delta U_{Z(Y)} + S_{Z(Y)}^W \Delta W_{Z(Y)}, \quad (25)$$

где

$$S_{Y(Z)}^U = - \left(\frac{\partial \Phi_{Y(Z)}}{\partial X} \right)^{-1} \frac{\partial \Phi_{Y(Z)}}{\partial U}; \quad (26)$$

$$S_{Y(Z)}^W = - \left(\frac{\partial \Phi_{Y(Z)}}{\partial X} \right)^{-1} \frac{\partial \Phi_{Y(Z)}}{\partial W}; \quad (27)$$

и

$$S_{Z(Y)}^U = - \left(\frac{\partial \Phi_{Z(Y)}}{\partial X} \right)^{-1} \frac{\partial \Phi_{Z(Y)}}{\partial U}; \quad (28)$$

$$S_{Z(Y)}^W = - \left(\frac{\partial \Phi_{Z(Y)}}{\partial X} \right)^{-1} \frac{\partial \Phi_{Z(Y)}}{\partial W}, \quad (29)$$

которые являются матрицами чувствительностей.

Векторы $\Delta X_{Y(Z)}$ и $\Delta X_{Z(Y)}$, выраженные через режимные параметры ЭЭС, можно представить в виде

$$\Delta X_{Y(Z)} = \begin{bmatrix} \frac{\Delta U_n}{\Delta \Psi_{Un}} \\ \frac{\Delta \Psi_{U\ell}}{\Delta \Psi_{U\ell}} \end{bmatrix}; \quad \Delta X_{Z(Y)} = \begin{bmatrix} \frac{\Delta I'_i}{\Delta I''_i} \end{bmatrix}. \quad (30)$$

Скорректированные режимные параметры определяются в виде

$$\begin{bmatrix} \frac{U_n}{\Psi_{Un}} \\ \frac{\Psi_{U\ell}}{\Psi_{U\ell}} \end{bmatrix}^H = \begin{bmatrix} \frac{U_n}{\Psi_{Un}} \\ \frac{\Psi_{U\ell}}{\Psi_{U\ell}} \end{bmatrix}^\Phi + \begin{bmatrix} \frac{\Delta U_n}{\Delta \Psi_{Un}} \\ \frac{\Delta \Psi_{U\ell}}{\Delta \Psi_{U\ell}} \end{bmatrix}; \quad \begin{bmatrix} I'_i \\ I''_i \end{bmatrix}^H = \begin{bmatrix} I'_i \\ I''_i \end{bmatrix}^\Phi + \begin{bmatrix} \frac{\Delta I'_i}{\Delta I''_i} \end{bmatrix}, \quad (31)$$

где H и Φ - соответственно новый и исходный или функционирующий установившиеся режимы.

В развернутой форме выражения (31) принимают следующий вид:

$$\begin{bmatrix} \frac{U_n}{\Psi_{U_n}} \\ \frac{\Psi_{U_n}}{\Psi_{U_\ell}} \end{bmatrix}^H = \begin{bmatrix} \frac{U_n}{\Psi_{U_n}} \\ \frac{\Psi_{U_n}}{\Psi_{U_\ell}} \end{bmatrix}^\Phi - \begin{bmatrix} \frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial U_n} & \frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial \Psi_{U_n}} & \frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial \Psi_{U_\ell}} \\ \frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial U_n} & \frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial \Psi_{U_n}} & \frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial \Psi_{U_\ell}} \\ \frac{\partial \Phi_{pk}}{\partial U_n} & \frac{\partial \Phi_{pk}}{\partial \Psi_{U_n}} & \frac{\partial \Phi_{pk}}{\partial \Psi_{U_\ell}} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial P_n} & \frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial Q_n} & \frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial P_\ell} \\ \frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial P_n} & \frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial Q_n} & \frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial P_\ell} \\ \frac{\partial \Phi_{pk}}{\partial P_n} & \frac{\partial \Phi_{pk}}{\partial Q_n} & \frac{\partial \Phi_{pk}}{\partial P_\ell} \end{bmatrix} \times \quad (32)$$

$$\times \begin{bmatrix} \frac{\Delta P_n}{\Delta Q_n} \\ \frac{\Delta Q_n}{\Delta P_\ell} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial U_n} & \frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial \Psi_{U_n}} & \frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial \Psi_{U_\ell}} \\ \frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial U_n} & \frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial \Psi_{U_n}} & \frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial \Psi_{U_\ell}} \\ \frac{\partial \Phi_{pk}}{\partial U_n} & \frac{\partial \Phi_{pk}}{\partial \Psi_{U_n}} & \frac{\partial \Phi_{pk}}{\partial \Psi_{U_\ell}} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial I'_i} & \frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial I''_i} & \frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial I'_j} \\ \frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial I'_i} & \frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial I''_i} & \frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial I'_j} \\ \frac{\partial \Phi_{pk}}{\partial I'_i} & \frac{\partial \Phi_{pk}}{\partial I''_i} & \frac{\partial \Phi_{pk}}{\partial I'_j} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{\Delta I'_i}{\Delta I''_i} \\ \frac{\Delta I''_i}{\Delta I'_j} \end{bmatrix};$$

$$\begin{bmatrix} I'_i \\ - \\ I''_i \end{bmatrix}^H = \begin{bmatrix} I'_i \\ - \\ I''_i \end{bmatrix}^\Phi - \begin{bmatrix} \frac{\partial \Phi_{pi}}{\partial I'_j} & \frac{\partial \Phi_{pi}}{\partial I''_j} \\ \frac{\partial \Phi_{qi}}{\partial I'_j} & \frac{\partial \Phi_{qi}}{\partial I''_j} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \frac{\partial \Phi_{pi}}{\partial U_n} & \frac{\partial \Phi_{pi}}{\partial \Psi_{U_n}} \\ \frac{\partial \Phi_{qi}}{\partial U_n} & \frac{\partial \Phi_{qi}}{\partial \Psi_{U_n}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta U_n \\ \Delta \Psi_{U_n} \end{bmatrix} - \quad (33)$$

$$- \begin{bmatrix} \frac{\partial \Phi_{pi}}{\partial I'_j} & \frac{\partial \Phi_{pi}}{\partial I''_j} \\ \frac{\partial \Phi_{qi}}{\partial I'_j} & \frac{\partial \Phi_{qi}}{\partial I''_j} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \frac{\partial \Phi_{pi}}{\partial P_j} & \frac{\partial \Phi_{pi}}{\partial Q_j} \\ \frac{\partial \Phi_{qi}}{\partial P_j} & \frac{\partial \Phi_{qi}}{\partial Q_j} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta P_j \\ \Delta Q_j \end{bmatrix}.$$

В случае, когда учитывается только изменение вектора возмущения W , выражения (32) и (33) принимают вид

$$\begin{bmatrix} U_n \\ \Psi_{U_n} \\ \Psi_{U_\ell} \end{bmatrix}^H = \begin{bmatrix} U_n \\ \Psi_{U_n} \\ \Psi_{U_\ell} \end{bmatrix}^\Phi - \begin{bmatrix} \frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial U_n} & \frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial \Psi_{U_n}} & \frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial \Psi_{U_\ell}} \\ \frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial U_n} & \frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial \Psi_{U_n}} & \frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial \Psi_{U_\ell}} \\ \frac{\partial \Phi_{pk}}{\partial U_n} & \frac{\partial \Phi_{pk}}{\partial \Psi_{U_n}} & \frac{\partial \Phi_{pk}}{\partial \Psi_{U_\ell}} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial P_n} & \frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial Q_n} & \frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial P_\ell} \\ \frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial P_n} & \frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial Q_n} & \frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial P_\ell} \\ \frac{\partial \Phi_{pk}}{\partial P_n} & \frac{\partial \Phi_{pk}}{\partial Q_n} & \frac{\partial \Phi_{pk}}{\partial P_\ell} \end{bmatrix} \times \quad (34)$$

$$\times \begin{bmatrix} \Delta P_n \\ \Delta Q_n \\ \Delta P_n \end{bmatrix},$$

$$\begin{bmatrix} I'_i \\ - \\ I''_i \end{bmatrix}^H = \begin{bmatrix} I'_i \\ - \\ I''_i \end{bmatrix}^\Phi - \begin{bmatrix} \frac{\partial \Phi_{pi}}{\partial I'_j} & \frac{\partial \Phi_{pi}}{\partial I''_j} \\ \frac{\partial \Phi_{qi}}{\partial I'_j} & \frac{\partial \Phi_{qi}}{\partial I''_j} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \frac{\partial \Phi_{pi}}{\partial U_n} & \frac{\partial \Phi_{pi}}{\partial \Psi_{U_n}} \\ \frac{\partial \Phi_{qi}}{\partial U_n} & \frac{\partial \Phi_{qi}}{\partial \Psi_{U_n}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta U_n \\ \Delta \Psi_{U_{ni}} \end{bmatrix}. \quad (35)$$

Частные производные $\frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial I'_i}$, $\frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial I''_i}$, $\frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial I'_j}$, $\frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial I''_j}$, $\frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial I'_j}$, $\frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial I''_j}$, $\frac{\partial \Phi_{pk}}{\partial I'_i}$, $\frac{\partial \Phi_{pk}}{\partial I''_i}$ и $\frac{\partial \Phi_{pk}}{\partial I'_j}$ определяются на основании аналитических выражений функций Φ_{pm} , Φ_{qm} .

Частные производные $\frac{\partial \Phi_{pi}}{\partial P_i}$, $\frac{\partial \Phi_{pi}}{\partial Q_j}$, $\frac{\partial \Phi_{qi}}{\partial P_j}$ и $\frac{\partial \Phi_{qi}}{\partial Q_j}$ определяются в виде

$$\frac{\partial \Phi_{pi}}{\partial P_j} = \begin{cases} 1 & \text{при } i = j; \\ 0 & \text{при } i \neq j; \end{cases} \quad \frac{\partial \Phi_{qi}}{\partial P_j} = \begin{cases} 0 & \text{при } i = j; \\ 0 & \text{при } i \neq j; \end{cases}$$

$$\frac{\partial \Phi_{pi}}{\partial Q_j} = \begin{cases} 0 & \text{при } i = k; \\ 0 & \text{при } i \neq k; \end{cases} \quad \frac{\partial \Phi_{qi}}{\partial P_j} = \begin{cases} 0 & \text{при } i = j; \\ 0 & \text{при } i \neq j. \end{cases}$$

Полученные матричные выражения (34) и (35) позволяют установить численные значения скорректированного установившегося режима на основании функционирующего установившегося режима.

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 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.

4. **Хачатрян В.С., Этмекчян Э.А., Бадалян Н.П.** Решение гибридных уравнений установившегося режима электроэнергетической системы методом диакоптики // Электричество .- 1999.- № 4.-С.7-12.
5. **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.
6. **Хачатрян В. С., Бадалян Н. П., Хачатрян К. В., Гулян А. Г.** Решение систем гибридных уравнений установившегося режима ЭЭС при смешанном типе станционных узлов // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН.-2001.-Т. 54, № 2.- С. 210-217.
7. **Хачатрян К. В., Бороян А. В.** Новый метод коррекции установившегося режима ЭЭС // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН.-2002.-Т 55, № 2.- С. 222-232.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 9.08.2002.

Կ.Վ. ԽԱՉԱՏՐՅԱՆ, Ա.Վ. ԲՈՐՈՅԱՆ

**ԷԼԵԿՏՐԱԷՆԵՐԳԵՏԻԿԱԿԱՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳԻ ԿԱՅՈՒՆԱՑՎԱԾ ՌԵԺԻՄԻ
ՃՇԳՐՏՈՒՄԸ P-U և P-Q ՏԵՄՔԻ ԿԱՅԱՆԱՑԻՆ ՀԱՆԳՈՒՑՑՆԵՐԻ ԴԵՊՔՈՒՄ**

Առաջարկվում է էլեկտրաէներգետիկական համակարգի կայունացված ռեժիմի ճշգրտման նոր մեթոդ՝ խառը տեսքի կայանային հանգույցների դեպքում: Կառուցված է համապատասխան մաթեմատիկական մոդել և առաջարկված է վերջինիս իրացումը:

K.V. KHACHATRYAN, A.V. BOROYAN

**STEADY-STATE CONDITION CORRECTION OF ELECTRIC POWER SYSTEM
(EPS) in P-U AND P-Q TYPES OF STATION NODES**

EPS steady-staty condition correction is proposed for P-U and P-Q types of station nodes. An appropriate mathematical model is constructed and the method of its realization is given.

Д.Т. АРШАКЯН, Г.М. ХОСТИКЯН

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ РАЗВИВАЮЩЕЙСЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ АРМЕНИИ

Разработана модель нахождения оптимальной структуры генерирующих мощностей ЭЭС Армении по типам электростанций и видам используемых энергоресурсов с учетом потребности в капитальных и материальных затратах, трудовых ресурсах.

Ключевые слова: электроэнергетическая система (ЭЭС), генерирующие мощности, имитационная модель, многофакторная матрица, ранжировка.

Целью оптимизационных расчетов является нахождение эффективных методов производства, распределения и использования продукции топливно-энергетического комплекса, общая потребность в которой задана на более высоком иерархическом уровне плановыми предложениями. В качестве критерия оптимизации можно рассматривать минимум приведенных затрат [1, 3]:

$$Z = E_n K + I, \quad (1)$$

где E_n – нормативный коэффициент эффективности капиталовложений; K – капиталовложения, *у.е.*; I – ежегодные расходы, *у.е./год*.

Многие проекты, финансирования и расчеты по определению направления развития ЭЭС Армении производились в долларовых эквивалентах. В данной работе в качестве единицы измерения принимается “условная единица” (*у.е.*), эквивалентная 570 драмам.

Отметим, что для оптимизации ЭЭС Армении необходимая располагаемая исходная информация большей частью носит нормативный, директивный и прогнозный характер, не всегда поддающийся четкому анализу и математической формулировке вследствие неопределенности стратегий, неполноты и недостаточной достоверности. Выбор оптимального состава энергообъектов представляет сложную математическую задачу нахождения экстремума многокомпонентной целевой функции при существующих ограничениях.

Сказанное в значительной степени ограничивает возможности применения имеющегося математического аппарата оптимизации подобных экономико-технологических систем, а в математическом понимании оптимальное решение просто не может быть найдено [1, 4].

Рассмотрим процесс имитации получения согласованного решения формирования оптимальной структуры ЭЭС Армении. Формирование планового решения базируется на результатах оптимизационных субмоделей получения набора вариантов развития существующих и предполагаемых источников энергоснабжения. Поэтому основным входным управляющим параметром выступает плановое задание по производству и отпуску энергии.

Выбор наилучшего варианта перспективного плана формирования структуры ЭЭС является основной задачей управления сложной экономико-технологической системой. В наиболее общем случае можно предполагать гипотетическую ЭЭС,

состоящую из m источников энергоснабжения (ТЭЦ, АЭС, ГЭС и др.), каждый из которых может производить ε видов энергии (электроэнергии, теплоты различных потенциалов). Критерием выбора наилучшего решения может служить минимум приведенных затрат, функционал которых по ЭЭС можно описать выражением

$$Z_c = \sum_{i=1}^m Z_{c_i} = \sum_{j=1}^s Z_{ТЭЦ_j} + \sum_{j=1}^l Z_{АЭС_j} + \sum_{j=1}^g Z_{ГЭС_j} + \dots \rightarrow \min, \quad (2)$$

где Z_c – приведенные затраты по i -му элементу системы, *у.е./год*; $Z_{ТЭЦ_j}$, $Z_{АЭС_j}$, $Z_{ГЭС_j}$ – то же, соответственно, по j -й ТЭЦ, АЭС, ГЭС и др., *у.е./год*.

При такой постановке задачи математическая модель формирования гипотетического ЭЭС может быть представлена в виде

$$\sum_{k=1}^m \sum_{t=1}^p Z_{kt} Z_{kt} \rightarrow \min, \quad \sum_{k=1}^m \sum_{t=1}^p N_{kt} Z_{kt} \geq N_p, \quad \sum_{t=1}^p Z_{kt} \leq 1, \quad (3)$$

$$k = \overline{1, m}, \quad Z_{kt} = 0 \vee 1,$$

где Z_{kt} – искомая интенсивность применения технологического решения (k, t), которая может принимать дискретное значение 0 или 1; N_{kt} – электрическая мощность k -го источника энергоснабжения при его развитии по варианту t , *МВт*; N_p – расчетное электропотребление гипотетического района, *МВт*. При $Z_{kt} = 1$ данный вариант формирования ЭЭС предпочтительнее, а при $Z_{kt} = 0$ его применение нежелательно.

На основании располагаемой информации о характере энергопотребления и динамике его роста производится формирование вероятных состояний развития ЭЭС путем заполнения определенного количества многофакторных матриц, характеризующих исходное состояние и направление развития системы с учетом длительности периода (по столбцам матрицы) и типа существующих и предполагаемых источников (по строкам матрицы).

Очевидно, в числе претендентов могут оказаться все возможные источники, а в качестве критерия могут выступать и другие равновеликие параметры [2,3].

ЭЭС Армении развивалась в составе объединенной системы Закавказья и Единой ЭС Советского Союза, которая и координировала энергоснабжение Армении, Азербайджана и Грузии. В условиях объединенной ЭЭС планирование электроэнергетики осуществлялось в интересах всей системы в целом. При таком подходе первоочередными считались задачи энергоснабжения всего региона, без должного учета особенностей отдельной республики. В результате этого в Армении были построены электростанции, работающие на природном газе и мазуте, хотя в республике фактически нет собственных запасов органического топлива и приходится его импортировать. В рамках такого подхода для дальнейшего развития ЭЭС была построена атомная электростанция (ААЭС). Единственным собственным источником производства электроэнергии в Армении является гидроэнергия.

Таким образом, экономический спад, вызванный распадом Советского Союза, привел к значительному сокращению электропотребления в республике.

Энергогенерирующее оборудование станций устаревает физически и морально, возникает необходимость в коренной реконструкции и модернизации, а иногда – в замене и демонтаже. Разработаны планы сценариев развития генерирующих мощностей для всех энергообъектов республики, основанные на

изучении материалов ведущих организаций (отечественных и зарубежных) в сфере энергетики и экономики. Основные направления развития ЭЭС республики будут заключаться в реконструкции и расширении существующих ТЭС и АЭС в технически допустимых и экономически целесообразных пределах, причем расширение теплофикации рассматривается на базе как конденсационных, так и теплофикационных энергоблоков.

В итоге рассмотрению подверглись 5 источников энергоснабжения Армении при 4 возможных вариантах их развития ($m=5, p=4$). Эти сценарии представлены в виде вариантов в табл. 1.

Таблица 1

Многофакторная матрица располагаемого и вероятного состояния формирования ЭЭС Армении

Номер и тип энерго-объектов	Исходные мощности по энергообъектам, МВт			
	Вариант 1		Вариант 2	
	Число и тип агрегатов	Эл. мощн.	Число и тип агрегатов	Эл. мощн.
1	2	3	4	5
1. ААЭС	-	0	1хВВЭР - 440	407.5
2. ГРЭС	3хК-200	600	4хК - 200 1хК - 300	1100
3. ЕрТЭЦ	1хПТ- 50-130 1хР - 50-130	100	1хПТ - 50-130 1хР - 50-130 1хПГУ - 80	180
4. СРК	Севан. -1х17 Атарб. - 1х40,8 Гюмуш. -1х56 Канак. - 1х26	139.8	Севан. - 1х17 Атарб. - 2х40,8 Гюмуш. - 1х56 Канак.- 2х12,5 1х26 Ереван. -1х22	227.56
5. ВК	Спанд. - 38 Шамб. - 85,5 Татев. - 52,4	175.9	Спанд. - 2х38 Шамб. - 1х85,5 Татев. - 2х52,4	266.3
	Вариант 3		Вариант 4	
1	6	7	8	9
1. ААЭС	2хВВЭР - 440	815	2хВВЭР - 440 1хВВЭР- 640	1455
2. ГРЭС	4хК - 200 2хК - 300	1400	4хК - 200 2хК - 300 1хПГУ - 440	1840

Продолжение табл. 1

3. ЕрТЭЦ	1хПТ- 50-130 1хР - 50-130 1хПГУ-80 1хГТУ-180	260	1хПТ- 50-130 1хР - 50-130 1хПГУ - 80 1хГТУ -180 1хПГУ - 400	660
4. СРК	Севан – 2х17 Атарб – 2х40,8 Гюмуш –2х56 Арзни – 2х23,5 Канак.-2х12,5 2х26 Ереван -1х 22	325.5	Севан – 2х17 Атарб – 2х40,8 Гюмуш – 4х56 Арзни – 3х23,5 Канак.-4х12,5 2х26 Ереван – 2х22	556
5. ВК	Спанд – 2х38 Шамб – 1х85,5 Татев – 3х52,4	318.7	Спанд – 2х38 Шамб – 2х85,5 Татев – 3х52,4	404

Приведенные затраты по энергообъектам рассчитываются на основании методических принципов ведения технико-экономических расчетов согласно действующим методическим положениям и инструктивным материалам [2]:

В качестве примера рассмотрим ААЭС:

$$Z_{\text{ААЭС}} = E_{\text{н}} K_{\text{ААЭС}} + I_{\text{ААЭС}} + z_{\text{т}} B_{\text{ААЭС}}, \quad (4)$$

где $K_{\text{ААЭС}}$ – капитальные вложения по ААЭС, *у.е.*; $I_{\text{ААЭС}}$ – годовые эксплуатационные расходы, *у.е./год*; $B_{\text{ААЭС}}$ – расход топлива по ААЭС, *т.у.т/год*; $z_{\text{т}}$ – удельные приведенные затраты на топливо, *у.е./т.у.т.*

Аналогично рассчитаны полные затраты и удельные показатели по остальным энергообъектам ЭЭС (табл. 2).

Таблица 2

Приведенные затраты по энергообъектам,
связанные с электрической мощностью

Номер и тип энерго- объектов	Приведенные затраты по энергообъектам							
	Вариант 1		Вариант 2		Вариант 3		Вариант 4	
	полные	удель- ные	полные	удель- ные	полные	удель- ные	полные	удель- ные
	млн.у.е./ год	тыс.у.е./ год.МВт	млн.у.е./ год	тыс.у.е./ год.МВт	млн.у.е./ год	тыс.у.е./ год.МВт	млн.у.е./ год	тыс.у.е./ год.МВт
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1. ААЭС	0	0	364,6	0,895	613,9	0,753	914,9	0,629
2. ГРЭС	310,8	0,518	492,6	0,447	579,3	0,414	701,9	0,381
3. ЕрТЭЦ	54,9	0,548	85,8	0,477	115,1	0,443	270,3	0,409
4. СРК	68,3	0,489	93,6	0,411	112,4	0,345	156,7	0,282
5. ВК	80,6	0,458	101,7	0,382	100,9	0,317	102,5	0,254

Рассмотрим поведение оптимального набора вариантов формирования структуры ЭЭС при изменении расчетного энергопотребления N_p . Анализ данных табл. 2 показывает, что в области расчетного энергопотребления N_p от 0 до 404 (404 - расчетная электрическая мощность технологического решения - 5:4) самым эффективным является технологическое решение - 5:4, характеризующееся минимальными удельными приведенными затратами.

По мере роста расчетного энергопотребления появляется необходимость применения менее эффективных технологических решений. Согласно табл. 3, следующим по эффективности является решение - 4:4, при котором область расчетного энергопотребления составляет [404, 960]. Аналогичным образом, увеличивая расчетное энергопотребление, приходим к результирующей матрице (табл. 3).

Таблица 3

Матрица оптимального набора вариантов по мере возрастания энергопотребления

Энерго- объекты	Вероятные состояния формирования источников – энергообъектов																			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
4	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1
5	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1
$N_p \in$	[0, 404]				[404, 960]				[960, 2800]				[2800, 3460]				[3460, 4915]			

Таким образом, анализ данных интенсивностей применения технологических решений позволяет производить набор оптимальных решений по всему диапазону изменения энергопотребления, ранжируя их по эффективности. Причем можно установить область минимальных суммарных приведенных затрат следующей функциональной зависимостью:

$$F(N_p) = \min \sum_{k=1}^m \sum_{t=1}^p z_{kt} Z_{kt}; \quad \{Z_{kt}\} \in S(\mathcal{E}), \quad (5)$$

где $S(\mathcal{E})$ – множество, определяемое условиями задачи.

Целочисленность рассматриваемой задачи показывает, что функцию $F(N_p)$ графически можно представить ступенчатой линией (см. рис.). При условии пренебрежения целочисленностью задачи функция $F(N_p)$ может изображаться кусочно-линейной кривой с отрезками, получающимися соединением узловых точек этой функции, где происходит присоединение новых технологических решений по убывающей эффективности. Причем угол наклона отрезков ломаной постоянно увеличивается, т.е. названная функция является выпуклой, что играет важную роль при обосновании сходимости алгоритма решения задачи согласования плановых заданий.

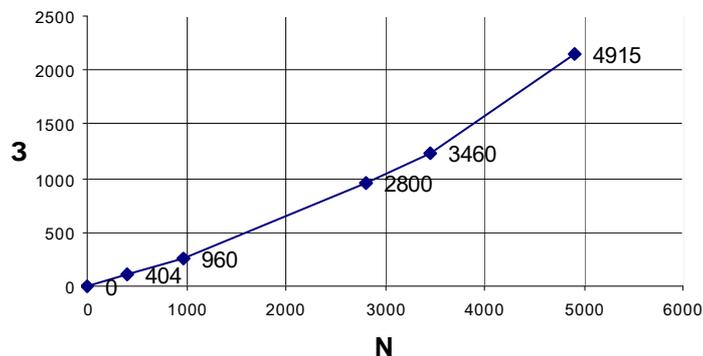


Рис. Зависимость минимальных суммарных приведенных затрат по ЭЭС от ее мощности

Высокая степень неопределенности исходного состояния ЭЭС и перспективы ее развития, а также информация, закладываемая в основу решения задачи, не позволяют прийти к однозначному решению относительно оптимальности структуры ЭЭС в динамике развития. Поэтому более приемлемым методом решения задачи является нахождение множества рациональных стратегий на базе формирования и анализа результирующей “платежной” матрицы $|Z_{kt}|$, характеризующей затраты по рассматриваемым состояниям развития системы [2].

На основе подробного анализа многофакторной и результирующей матрицы можно прийти к наиболее предпочтительным направлениям развития ЭЭС, тем самым частично преодолевая неопределенность задачи [6, 7].

Приведенная имитационная модель развивающейся ЭЭС Армении пригодна как для нахождения оптимальной структуры системы в динамике ее развития (определение очередности и сроков, приоритетности вводимых источников), так и для оптимального управления режимами работы ЭЭС и электростанций (определение очередности подключения источников и агрегатов, распределение нагрузки между работающими источниками и агрегатами и др.) [5, 6].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Мелентьев Л. А.** Оптимизация развития и управления больших систем энергетики.- М.: Высшая школа, 1976. – 336 с.
2. **Аршакян Д.Т.** Математическая модель развивающейся теплоснабжающей системы // Теплоэнергетика. - 1987. - N 8. - С. 50-53.
3. **Шипова А. Н.** Экономика энергетики СССР.- М.: Высшая школа, 1986. - 352 с.
4. **Моисеев Н. Н.** Математические задачи системного анализа.- М.: Наука, 1981. - 489 с.
5. **Кини Р. Л., Райфа Х.** Принятие решений при многих критериях: предложение и замещение.- М.: Радио и связь, 1981. - 560 с.
6. **Нейман Дж. Фон, Моргенштерн О.** Теория игр и экономическое поведение.- М.: Наука, 1970. - 707 с.

7. **Арзамасцев Д. А., Ананичева С. С., Мардер Л. И., Мызин А. Л., Стаймова Е. Д.**
Имитационный подход к моделированию развития и размещения генерирующих мощностей // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт.- 1987.- № 6. - С. 10-18.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 18.01.2002.

Դ.Թ. ԱՐՇԱԿՅԱՆ, Գ.Մ. ԽՈՍՏԻԿՅԱՆ

**ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԶԱՐԳԱՑՈՂ ԷԼԵԿՏՐԱԷՆԵՐԳԵՏԻԿԱԿԱՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳԻ
ԻՄԻՏԱՑԻՈՆ ՄՈՂԵԼ**

Մշակված է Հայաստանի էլեկտրաէներգետիկական համակարգի հզորությունների օպտիմալ կառուցվածքի որոշման մոդելն ըստ էլեկտրակայանների տիպերի և վառելիքի տեսակի՝ էլնելով կապիտալ և նյութական ծախսերից ու աշխատանքային ռեսուրսների պահանջարկից:

D.T. ARSHAKYAN, G.M. KHOSTIKYAN

**IMITATION MODEL FOR DEVELOPING POWER STATIONS
IN ARMENIA**

An optimum structure model of the power system capacities in Armenia is developed. The types of power plants and energy resources according to the demand in capital and material costs as well as in labor resources are given.

В.Б. НЕРСИСЯН

ДИНАМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ РАБОТЫ ВИХРЕТОКОВОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ ТОЛЩИНЫ И СКОРОСТИ ПРОКАТКИ НЕФЕРРОМАГНИТНОЙ ПРОВОДЯЩЕЙ ПОЛОСЫ

Проведено исследование электромагнитных процессов в динамическом режиме вихретокового преобразователя. Приведена картина магнитных потоков. Определены трансформаторная ЭДС и ЭДС движения, а также токи, обусловленные этими ЭДС. Магнитная индукция и МДС этих токов определены с учетом линейной плотности токов. Разработана методика одновременного измерения скорости и толщины прокатки полосы.

Ключевые слова: динамический режим, магнитный поток, вихретоковый, трансформаторный.

Измерение параметров проводящей неферромагнитной полосы в процессе прокатки, в частности, толщины и скорости, является важной технико-экономической задачей, для решения которой применяют различные физические принципы и соответствующие методы. Среди них наиболее целесообразным с точки зрения практического использования является вихретоковый метод, сущность которого заключается в следующем: прокатываемая проводящая полоса, расположенная в щелевом зазоре вихретокового преобразователя (ВТП), пронизывается рабочим магнитным потоком. При этом в полосе индуцируются два вида ЭДС: трансформаторная и ЭДС движения, вызывающие, в свою очередь, соответствующие токи, магнитные потоки которых могут быть представлены как результат наложения потоков, создаваемых каждым током в отдельности [1,2].

Отдельно эти процессы были проанализированы в [3, 4].

Однако представляет интерес также обобщение этих явлений, что и является целью настоящей работы.

На рис.1 а показаны рабочий зазор магнитной цепи ВТП с движущейся со скоростью V неферромагнитной проводящей полосой толщиной h , а также закономерность распределения токов трансформации (вихревые) и движения. В полосе условно на первой строке показаны зависимости токов от скорости движения i_v (рис.1 б) а на второй - от трансформации i_t (рис.1 в), причем стрелками и крестиками обозначены направления этих токов. Здесь же приведена картина магнитного поля, где B_0 - магнитная индукция в зазоре, обусловленная токами обмотки возбуждения; v - линейная скорость движения полосы; h - толщина полосы; δ - величина рабочего воздушного зазора ВТП; Φ_p - рабочий магнитный поток, обусловленный токами возбуждения; Φ_t - магнитный поток от токов трансформации i_t в полосе; Φ_v - магнитный поток от токов скорости i_v в полосе; k_1 и k_2 - измерительные катушки скорости движения полосы, k_3 - измерительная катушка толщины полосы.

$$B_0(t) = B_0(x, y, t) = B_0 \sin \omega t, \text{ где } -b_0 < x < b_0, -a_0 < y < a_0.$$

Трубки токов i_v и i_T , показанные на рис.1 б и в, если на полосу смотреть сверху, учитывают наличие края полосы на расстоянии $a_0 + a_1$ вдоль оси y . В направлении отрицательной оси y принимаем, что размер полосы большой по сравнению с измерительной зоной преобразователя.

Примем также, что магнитное поле возбуждения B_0 в рабочем зазоре магнитной цепи вдоль оси z одинаково в пределах всего ее сечения $2a_0 \times 2b_0$ и совпадает с геометрией сечения полюсных наконечников. Магнитные поля токов i_v и i_T полосы, существующие практически намного больше, чем в сечении воздушного зазора $2a_0 \times 2b_0$, имеют только z -ю составляющую и замыкаются через ферромагнитный сердечник полюсного наконечника.

Определим магнитный поток, обусловленный токами скорости i_v в полосе (рис.1 б). На расстоянии x от центральной оси OO' полюсного наконечника сечением hdx показана трубка тока i_v . Активная длина такой трубки равна $2a_0$, и в ней индуцируется ЭДС

$$e_{v_y}^*(x) = V 2a_0 B_{0m} \sin \omega t. \quad (1)$$

Как следует из рис.1 б, в длина трубки тока i_v будет $l_v(x) = 2a_0 + 2\pi r_L + 2a_0$, где $r_L = b_0 - x$ - радиус лобовой части трубки. Тогда $l_v(x) = 4a_0 + 2\pi(b_0 - x)$, что совпадает с исходными данными [4], где для магнитного потока Φ_v скорости от i_v было получено выражение

$$\Phi_v = -\mu_0 \frac{(2a_0)^2 h}{2\pi\rho\delta} \left(b_0 + \frac{2a_0 + \pi b_0}{\pi} \ln \frac{2a_0}{2a_0 + \pi b_0} \right) V B_{0m} \sin \omega t. \quad (2)$$

Теперь определим магнитный поток Φ_T от вихревых токов i_T в полосе.

Как следует из рис.1 в, трубка тока i_T имеет длину $l_T(x) = 2a_0 + 2\pi x + 2a_0 = 4a_0 + 2\pi x$. Активная проводимость вдоль этой трубки обратна ее активному сопротивлению, поскольку можно пренебречь магнитным полем вихревых токов, а следовательно, и соответствующим индуктивным сопротивлением.

В результате имеем

$$dg_T(x) = \gamma \frac{hdx}{l_T(x)}, \quad (3)$$

где $\gamma = \frac{1}{\rho}$ - проводимость материала полосы; hdx - сечение трубки тока i_T .

Индуцируемая ЭДС в площади, ограниченной $l_T(x)$, будет

$$e_{y^T}(t) = -(2a_0 2x + \pi x^2) \frac{dB}{dt} = -(4a_0 x + \pi x^2) B_{0m} \omega \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right). \quad (4)$$

Элементарный ток в трубке:

$$di_T(x) = e^T_y(x) dg_T(x) = -(4a_0x + \pi x^2) \omega \gamma \frac{h}{l_T(x)} B_{0m} \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}) dx. \quad (5)$$

На единицу длины вдоль оси x получаем величину линейной плотности тока:

$$\tau(x) = \frac{di(x)}{dx} = -(4a_0x + \pi x^2) \omega \gamma \frac{h}{l_T(x)} B_{0m} \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}). \quad (6)$$

Перепишем (6) с учетом $l_T(x)$:

$$\tau(x) = -(4a_0x + \pi x^2) \frac{\omega \gamma h}{4a_0 + 2\pi x} B_{0m} \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}). \quad (7)$$

МДС от тока $\tau(x)$ будет

$$F_z(x) = \tau(x)x = -\omega \gamma h B_{0m} \frac{(4a_0x + \pi x^2)}{4a_0 + 2\pi x} \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}). \quad (8)$$

Индукция в зазоре:

$$B_z(x) = \mu_0 \frac{F_z(x)}{\delta} = -\omega \gamma h B_{0m} \frac{(4a_0x + \pi x^2)x}{(4a_0 + 2\pi x)\delta} \mu_0 \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}). \quad (9)$$

Магнитный поток от вихревых токов полосы равен

$$\begin{aligned} \Phi_T &= 2a_0 \int_0^{b_0} B_z(x) dx = -2a_0 \omega \gamma \mu_0 h \frac{B_{0m}}{\delta} \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}) \times \\ &\times \int_0^{b_0} \frac{(4a_0x + \pi x^2)x}{4a_0 + 2\pi x} dx = \frac{-2a_0 b_0 \omega \gamma \mu_0}{\delta} h \times \\ &\times \left[C_0 + \frac{16}{\pi^2} \frac{a_0^3}{b_0} \ln(1 + \frac{\pi b_0}{2a_0}) \right] B_{0m} \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}). \end{aligned} \quad (10)$$

$$\text{Здесь } C_0 = \frac{b_0^2}{3} - \frac{2a_0^2}{\pi^3} + \frac{a_0 b_0}{2\pi^2} - \frac{1}{2\pi} \frac{b_0^2}{3}.$$

Как следует из рис.1 а, магнитный поток в пределах половины полюсного наконечника левее оси OO' через катушку K_2 будет

$$\Phi_{д} = \frac{1}{2} \Phi_{р-} - \frac{1}{2} \Phi_{v+} + \Phi_T, \quad (11)$$

а правее оси OO' через катушку K_1 :

$$\Phi_{п} = \frac{1}{2} \Phi_{р+} + \frac{1}{2} \Phi_{v-} + \Phi_T. \quad (12)$$

Из выражения потоков $\Phi_{д}$ и $\Phi_{п}$ следует, что для измерения толщины прокатываемой полосы необходимо дифференциально включенные измерительные обмотки K_1 и K_2 установить так, чтобы площади обмоток одной половины

пронизывались потоком $\Phi = \Phi_{л} + \Phi_{п} = \Phi_{р} + 2\Phi_{т}$ (катушка Кз), а площади второй половины (расположенные на стержне обмотки возбуждения - на рисунке не показаны) - потоком $\Phi_{р}$. В результате будем иметь

$$\begin{aligned} e_{т} &= -w_{т} \frac{d(\Phi_{р} + 2\Phi_{т} - \Phi_{р})}{dt} = -2w_{т} \frac{d\Phi_{т}}{dt} = \\ &= 2w_{т} \frac{2a_0 b_0 \omega^2 \gamma \mu_0 h}{\delta} \left[C_0 + \frac{16 a_0^3}{\pi^2 b_0} \ln\left(1 + \frac{\pi b_0}{2a_0}\right) \right] B_{0m} \sin \omega t. \end{aligned} \quad (13)$$

При измерении скорости полосы необходимо секции дифференциально включенных обмоток К1 и К2 установить так, как это показано на рис.1 а. При этом ЭДС движения будет равна

$$\begin{aligned} e_{v} &= -w_{v} \frac{d(\Phi_{л} - \Phi_{п})}{dt} = -w_{v} \frac{d\Phi_{т}}{dt} = \\ &= \omega w_{v} \mu_0 \frac{2a_0^2 \gamma h}{\pi \delta} \left(b_0 + \frac{2a_0 + \pi b_0}{\pi} \ln \frac{2a_0}{2a_0 + \pi b_0} \right) V B_{0m} \cos \omega t. \end{aligned} \quad (14)$$

Таким образом, выходные ЭДС катушек трансформации Кз пропорциональны толщине полосы и не зависят от скорости полосы, а выходные ЭДС катушек скорости К1 и К2 пропорциональны толщине и скорости полосы.

ЭДС e_v и e_t находятся в квадратуре (рис.1 г). Так как

$$E_t = C_t h \omega^2; \quad E_v = C_v h \omega V,$$

где

$$\begin{aligned} C_t &= 4w_{т} a_0 b_0 \gamma \mu_0 \left[C_0 + \frac{16 a_0^3}{\pi^2 b_0} \ln\left(1 + \frac{\pi b_0}{2a_0}\right) \right] B_{0m}, \\ C_v &= w_{v} \mu_0 a_0^2 \gamma \left(b_0 + \frac{2a_0 + \pi b_0}{\pi} \ln \frac{2a_0}{2a_0 + \pi b_0} \right) B_{0m} - \end{aligned} \quad (15)$$

коэффициенты, зависящие от параметров полосы и конструкции ВТП; ω - угловая частота возбуждения; h - толщина полосы; v - скорость движения полосы, то отношение величин этих ЭДС не зависит от параметров полосы:

$$\frac{E_v}{E_t} = \text{tg } \varphi = A \frac{V}{\omega}, \quad (16)$$

где

$$A = \frac{w_{v} a_0 \left(b_0 + \frac{2a_0 + \pi b_0}{\pi} \ln \frac{2a_0}{2a_0 + \pi b_0} \right)}{w_{т} 2b_0 \left[C_0 + \frac{16 a_0^3}{\pi^2 b_0} \ln\left(1 + \frac{\pi b_0}{2a_0}\right) \right] \pi}.$$

Поскольку угол φ не зависит от параметров полосы и является функцией ее скорости, то задача компенсации влияния параметров полосы на результат измерения скорости будет решена, если при постоянной частоте обмотки возбуждения в качестве выходной измеряемой величины выбрать этот угол.

Максимальная чувствительность измерителя толщины и скорости полосы достигается при равенстве величин ЭДС трансформации и движения:

$$E_{\tau} = E_v. \quad (17)$$

Таким образом, разработка, исследование и конструирование ВТП с одновременным измерением толщины и скорости прокатки полосы резко повышает эффективность использования этого класса преобразователей и расширяет область применения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Нерсисян В.Б.** Патент N1223026 (Российская Федерация). Вихретоковый преобразователь 30.06.93.
2. **Нерсисян В.Б.** Определение параметров эквивалентной схемы замещения вихретокового толщиномера // Изв.НАН РА и ГИУА. Сер. ТН.- 2000. - Т.53, № 3. - С. 377- 381.
3. **Арешян Г.Л., Нерсисян В.Б.** Определение толщины проводящей пластины в зазоре магнитной цепи вихретокового преобразователя// Изв.НАН РА. Сер. ТН. - 2001. - № 1. - С. 67-75.
4. **Арешян Г.Л., Нерсисян В.Б.** Определение скорости прокатки проводящей полосы вихретоковым методом // Изв.НАН РА. Сер. ТН.-2001.- № 3. - С. 384-394.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 15.12.2001.

Վ.Բ. ՆԵՐՍԻՍՅԱՆ

ՈՉ ՖԵՌՈՄԱԳՆԻՍԱԿԱՆ ՀԱՂՈՂԻՉ ԹԻԹԵՂԻ ՀԱՍՏՈՒԹՅԱՆ ԵՎ ՀԱՐԺՄԱՆ ԱՐԱԳՈՒԹՅԱՆ ՄՐԴԿԱՀՈՍԱՆՔԱՅԻՆ ՉԱՓԻՉԻ ԱՇԽԱՏԱՆՔԸ ԴԻՆԱՄԻԿ ՌԵՇԻՄՈՒՄ

Հետազոտված են էլեկտրամագնիսական պրոցեսները մրրկահոսանքային ձևափոխիչի դինամիկ ռեժիմում: Բերված է մագնիսական հոսքերի բաշխման օրինաչափությունը ձևափոխիչի օդային բացակում: Որոշվել են տրանսֆորմատորային և թիթեղի շարժումով պայմանավորված էլեկտրաշարժ ուժերը, ինչպես նաև նրանցով պայմանավորված հոսանքները: Այդ հոսանքների գծային խտությունից էլնելով՝ որոշվել են նրանց մագնիսաշարժ ուժը և մագնիսական ինդուկցիան: Մշակված է շարժվող թիթեղի արագության և հաստության միաժամանակյա չափման մեթոդը:

V.B. NERISSYAN

DYNAMIC WORKING CONDITIONS FOR EDDY-CURRENT THICKNESS AND ROLLING SPEED METER OF NONFERROMAGNETIC CONDUCTING BAND

Electromagnetic processes are investigated in dynamic conditions on the eddy-current transformer. The magnetic flux picture is given. E.m.f. and e.m.f. motion transformation as well as current conditions by these e.m.f. are determined. Magnetic induction and m.m.f. of these currents are determined in terms of linear current density. The technique of simultaneous speed and band rolling thickness measurement is developed.

С.Г. КЮРЕГЯН, Б.М. МАМИКОНЯН, В.К. ШМЕЛЕВ, С.В. АБГАРЯН,
С.Ш. БАЛАСАНИЯН

К ВОПРОСУ ОБ УПРАВЛЕНИИ ФЛОТАЦИОННЫМ ПРОЦЕССОМ ОБОГАЩЕНИЯ МОЛИБДЕНОВОЙ РУДЫ

Технологический процесс флотационного обогащения медно-молибденовой руды Каджаранской обогатительной фабрики представлен многомерным объектом управления с распределенными параметрами. С целью организации автоматизированного управления процессом построены математические модели, определены оптимальные настройки параметров процесса и функции автоматизированного рабочего места оператора.

Ключевые слова: флотация, молибден, руда, модель, оптимизация, управление.

Сущность флотационного обогащения руд ценных металлов заключается в извлечении раздробленных мелких крупиц металлов и их соединений из пульпы флотмашин на поверхность в пену для ее отбора в последующие операции и в завершение – для приготовления концентрата. С целью повышения эффективности этого извлечения до формирования конечного концентрата процесс многократно циклически повторяют. В случае извлечения нескольких ценных компонентов технологический процесс проводится по коллективно-селективной схеме [1].

На Каджаранской обогатительной фабрике (КОФ) в результате цикла коллективной флотации получают медно-молибденовый 1 (см. рис.), а по циклу селективной флотации – молибденовый 2 и медный (на рис. не показано) концентраты [2]. В свою очередь, каждый цикл состоит из трех операций: основной (1.1 и 2.1), контрольной (1.2 и 2.2) и перечистой (1.3 и 2.3) флотаций [2]. В результате основной коллективной и молибденовой флотаций извлекается большая часть полезного компонента в черновой концентрат, который подается на перечистную флотацию. Контрольная флотация служит для доизвлечения (контроля) оставшегося в пульпе компонента и возвращения на вход основной флотации, а пульпа сливается в отвальные хвосты (после молибденовой флотации – на медную селективную флотацию). Перечистная флотация состоит, как правило, из нескольких циклов и проводится с целью освобождения (очистки) черного концентрата от пустой породы, дофлотации и получения готового концентрата. Коллективная основная и контрольная флотации состоят из нескольких параллельных линий (ниток), которые объединяются после основной и контрольной флотаций.

Управление процессом при постоянстве прочих физических параметров во флоткамерах (плотность и уровень пульпы, степень аэрации, отбор пены и др.) осуществляется поддержанием реагентных режимов, в состав которых входят регуляторы среды пульпы, пенообразователи, собиратели и депрессоры [1]. Собиратели, обладая избирательностью по отношению к сульфидам металлов,

служат для извлечения последних с помощью пузырьков воздуха на поверхность в пену. Депрессоры применяются для осаждения остальных металлических компонентов при селекции одного из них, а также осаждения пустой породы.

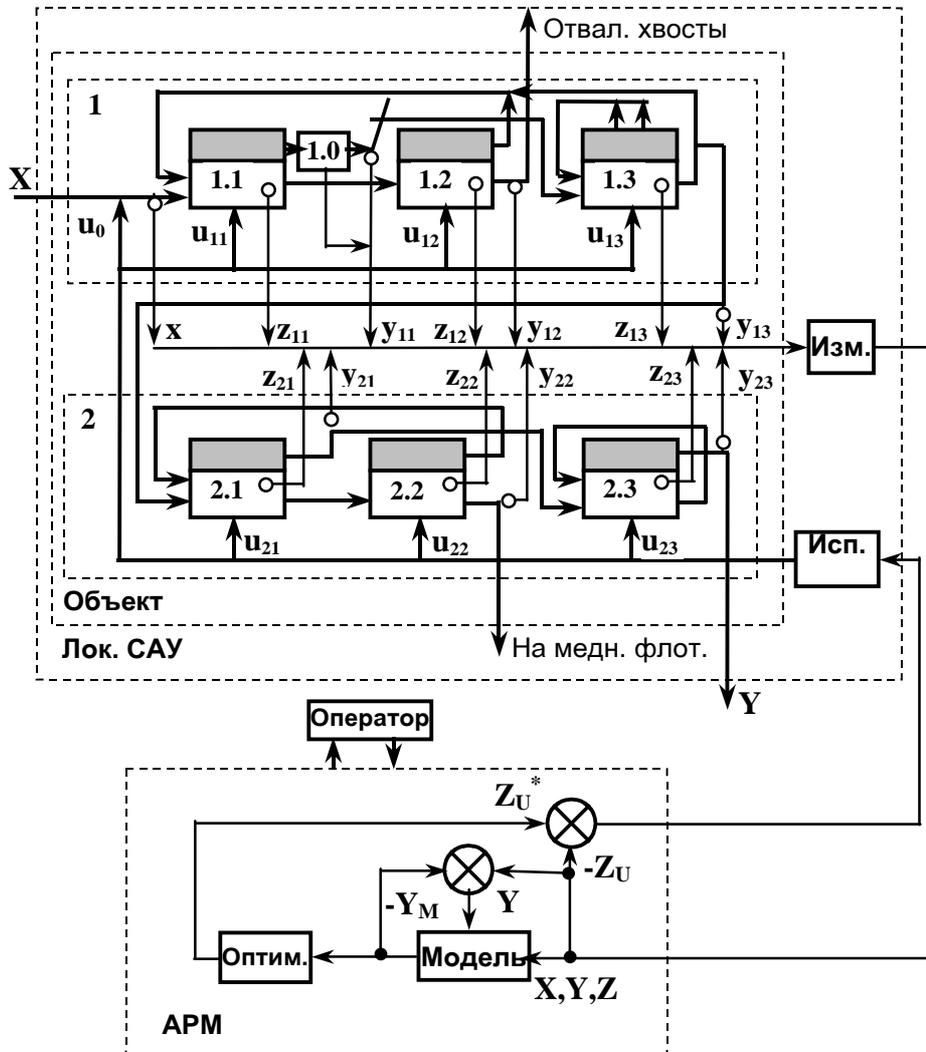


Рис. Функциональная схема системы распределенного управления флотационным процессом:
 1.1–1.3, 2.1–2.3 – флотмашины (затемненной частью показана пена);
 1.0 – аппаратура доизмельчения

Таким образом, флотационный процесс можно представить как объект с распределенными в пространстве параметрами, где к входным \mathbf{X} относятся физико-химические параметры поступающей на флотацию пульпы, к выходным $\mathbf{Y}=\{y_{ij}\}$ – качественные параметры черного и конечного концентратов и хвостов флотации, а также количественные показатели конечного концентрата, к режимным $\mathbf{Z}=\{z_{ij}\}$ – остаточные концентрации реагентов, а к управляющим $\mathbf{U}=\{u_{ij}\}$ – расходы этих реагентов ($i=1,2$; $j=1,2,3$). При наличии соответствующих измерительных и исполнительных устройств можно организовать систему локального автоматического управления (САУ) многомерным объектом с распределенными параметрами по схеме рисунка.

С целью оптимального управления процессом флотации необходимо построить математическую модель процесса, оптимизировать выбранный критерий и определить оптимальные уставки $\mathbf{Z}^* = \{z_{ij}^*\}$ остаточных концентраций реагентов.

Ввиду случайного характера входных параметров и сложности математического описания всего многообразия механизмов флотации целесообразно построить математическую модель статистическими методами на основании данных наблюдений [1]. Обработка имеющейся базы данных наблюдений за двенадцатью входными и режимными переменными с помощью пакета Statistika показала, что плотности распределений всех существенных переменных, характеризующих флотационный процесс, близки к нормальному закону. Построение математической модели предлагается осуществить методом группового учета аргументов (МГУА), который применим для базы данных с любым законом распределений переменных [3]. Исходные данные разбиваются на обучающую и проверочную последовательности с числом наблюдений, соответственно, k и k_1 . Обучающая последовательность используется для оптимизации оценок коэффициентов регрессии, проверочная – для уточнения числа членов и степени уравнения регрессии. Это позволяет получить наиболее регулярное решение, мало чувствительное к небольшим изменениям исходных данных, с наименьшей ошибкой на новых точках наблюдений. В качестве критериев селекции выбраны регулярность и коэффициент корреляции. Модели, найденные по этим критериям, являются оптимальными, как следует из [3, 4].

Полное описание объекта

$$y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (1)$$

с p существенными переменными x_i заменяется несколькими рядами частных описаний, каждое из которых является функцией только двух аргументов. Первый ряд селекции состоит из $s = C_n^2$ уравнений:

$$y_1=f(x_1,x_2); y_2=f(x_1,x_3); \dots ; y_s=f(x_{n-1},x_n),$$

из которых отбираются p наиболее регулярных моделей, удовлетворяющих критерию минимума среднеквадратической ошибки, измеренной на проверочной последовательности:

$$\Delta_p^2 = \sum_{i=1}^{k_1} (y_i - y_i^*)^2 / k_1 ,$$

$$\delta_p^2 = 100 \left[\sum_{i=1}^{k1} (y_i - y_i^*)^2 \right] / \sum_{i=1}^{k1} y_i^2, \% \quad (2)$$

где Δ_p , δ_p - соответственно абсолютная и относительная среднеквадратические ошибки на проверочной последовательности; y_i , y_i^* - значение прогноза и действительное значение выхода в i -й точке.

Одновременно определяется и коэффициент корреляции:

$$R_{y,y^*} = \left(\sum_{i=1}^{k1} y_i y_i^* \right) / \left(\sum_{i=1}^{k1} y_i^2 \sum_{i=1}^{k1} y_i^{*2} \right)^{1/2}.$$

Во втором ряду селекции выходные переменные первого ряда снова объединяют в пары и получают более сложные модели этого уровня.

Селекция по рядам продолжается до тех пор, пока критерий (2) не достигает минимума. В последнем ряду выбирается одна оптимальная по заданному критерию модель. Таким образом, из ряда в ряд при помощи пороговых отборов пропускается только некоторое количество самых регулярных переменных. Изменением величины порога можно добиться повышения регулярности и достоверности модели. Исключая промежуточные переменные, получаем аналог полного описания (1).

Предварительные исследования [5] показали, что специфическим требованиям описания процесса флотации КОФ наиболее полно удовлетворяют иерархические математические модели квадратичной формы:

$$y_{vk} = \xi_{vk}^T Q_{vk} \xi_{vk} + p_{vk}^T \xi_{vk} + c_{vk}, \quad (3)$$

где y_{vk} - k -я модель v -го уровня; $k = \overline{1, n}$; $v = \overline{1, m}$; n - количество независимых существенных переменных; m - количество уровней иерархий,

$$\xi_{vk} = \begin{cases} [x_r; x_s]^T & (r \neq s), \text{ при } v = 1; x_r, x_s \in \mathbf{X}, \mathbf{Z}; \\ [y_{v-1,r}; y_{v-1,s}]^T & (r \neq s), \text{ при } v = \overline{2, m}; \end{cases}$$

$Q_{vk} = \text{diag}\{q_{vkr}\}$ - квадратичная матрица $2(2)$; $p_{vk} = [p_{vkr}; p_{vks}]^T$;

$q_{vkr}, p_{vkr}, p_{vks}, c_{vk}$ - коэффициенты регрессии k -й модели (v -го уровня; $r, s = \overline{1, n}$; на последнем уровне ($v=m$) выделяется одна модель y_m).

Возможность постепенного "вертикального нарастания" сложности в МГУА обеспечивает реализацию принципа адекватности модели: по минимуму критерия селекции определяется модель оптимальной сложности, адекватная объекту.

Выбирая в качестве модели y_m различные технико-экономические показатели эффективности производства (например, содержание молибдена в концентрате, извлечение молибдена в концентрат, прибыль от реализации продукции и др.) как целевые функции, можно поставить всевозможные оптимизационные задачи, например:

1. Максимизация функции цели по входным параметрам и определение оптимальных настроек этих параметров

$$\max_x y_m \Rightarrow x^* . \quad (4)$$

2. Максимизация функции цели по режимным параметрам и определение оптимальных настроек остаточных концентраций реагентов

$$\max_z y_m \Rightarrow Z^* . \quad (5)$$

Задача (4) представляет интерес с точки зрения коррекции технологических настроек входных x параметров, например, таких, как содержание полезного компонента в исходной руде, обеспечиваемое предварительной шихтовкой, гранулометрический состав измельченной руды в пульпе и др., а результаты задачи (5) помогут настроить оптимальный с точки зрения выбранного критерия реагентный режим z^* при отклонениях значений входных параметров от номинальных технологических.

Все возникающие оптимизационные задачи в соответствии с моделью (3) сводятся к задачам нелинейного программирования с ограничениями на нижние и верхние пределы оптимизируемых переменных (x или z), которые для нормального закона распределения этих переменных определяются с доверительной вероятностью 95% из соотношения

$$m \pm 1,96s,$$

где m , s – математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение переменных в выборке.

Управление процессом и наблюдение за его ходом осуществляется с автоматизированного рабочего места (АРМ) оператора (см. рис.), представляющего собой компьютер, входные и выходные порты которого подсоединены соответственно к измерительным и исполнительным устройствам, при наличии таковых. В случае их отсутствия информация о переменных, характеризующих процесс, может быть введена в компьютер вручную. В настоящее время на КОФ из-за отсутствия средств измерений параметров на потоке информацию о параметрах получают в основном путем лабораторного анализа.

АРМ может функционировать в операционной системе Windows 95 и выше и содержит программы “Модель” и ”Оптимизация”. Программа “Модель” реализована посредством инструментальной среды программирования Visual C++ 6.0 и позволяет:

- накапливать текущие значения параметров процесса, осреднять их за смену и записывать в буферную память;
- строить модель (2) МГУА по среднесменным данным 40 – 50 наблюдений;
- осуществлять прогноз показателей производства при вариации входных и управляющих параметров;
- контролировать адекватность действующей модели текущему процессу.

Программа ”Оптимизация” осуществляется в среде MS Excel, выбор которой обусловлен не только наличием дружественного интерфейса, но и выходными формами модели МГУА, полученными с помощью программы ”Модель” на языке C++, которые представляются в текстовом файле, а числовые данные отделяются знаками табуляции и легко переносятся в табличные страницы программы MS Excel. Далее в среде MS Excel выполняется решение задачи оптимизации.

Для организации взаимодействия пользователя с пакетами программ разработан удобный интерфейс, содержащий современные органы управления

программой: иерархические выпадающие меню, диалоговые окна, электронные таблицы. Оператор имеет возможность:

- наблюдать за ходом процесса посредством поступающих на экран значений параметров;
- задавать построение модели в автоматическом режиме или по внешней команде;
- выбирать функцию цели для оптимизации;
- задавать внешние или оптимальные уставки САУ.

В соответствии с отклонениями текущих значений остаточных концентраций реагентов от оптимальных уставок, определяемых с помощью программы "Оптимизация", исполнительными устройствами осуществляется управление расходом реагентов в каждой операции.

Как показали предварительные расчеты [4], при оптимальном управлении процессом флотации молибденовой руды на КОФ ожидается увеличение прибыли производства примерно на 10% и увеличение извлечения молибдена в концентрат на 5%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Сорокер Л.В., Швиденко А.А.** Управление параметрами флотации. - М.: Недра, 1979. – 232 с.
2. Технологическая инструкция Каджаранской обогатительной фабрики. - Ереван – Каджаран, 1981. – 88 с.
3. **Ивахненко А.Г., Юрачковский Ю.П.** Моделирование сложных систем по экспериментальным данным. – М.: Радио и связь, 1981. - 120 с.
4. **Ивахненко А.Г., Зайченко Ю.П., Дмитров В.Д.** Принятие решения на основе самоорганизации. - М.: Сов. радио, 1976. - 280 с.
5. **Кюрегян С.Г., Абгарян С.В., Баласанян С.Ш.** Моделирование и оптимизация флотационного процесса обогащения молибденовой руды // Труды Международной конференции «Компьютерные науки и информационные технологии». - Ереван, 1999. – С. 481.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 10.07.2001.

**Ս.Գ.ԿՅՈՒՐԵԴՅԱՆ, Բ.Մ.ՄԱՄԻԿՈՆՅԱՆ, Վ.Կ.ՇՄԵԼՅՈՎ, Ս.Վ.ԱԲԳԱՐՅԱՆ,
Ս.Շ.ԲԱԼԱՍՅԱՆՅԱՆ**

**ՄՈԼԻԲԴԵՆԱՅԻՆ ՀԱՆՔԱՆՅՈՒԹԻ ՀԱՐՍՏԱՑՄԱՆ ՖԼՈՏԱՑԻՈՆ ԳՈՐԾՆԹԱՑԻ
ՂԵԿԱՎԱՐՄԱՆ ՀԱՐՑԻ ՎԵՐԱԲԵՐՅԱԼ**

Քաջարանի պղնձամոլիբդենային հարստացուցիչ ֆաբրիկայի հանքահարստացման տեխնոլոգիական գործընթացը ներկայացված է որպես բաշխված պարամետրերով բազմաչափ ղեկավարման օբյեկտ: Գործընթացի ավտոմատացված ղեկավարում կազմակերպելու նպատակով կառուցված են մաթեմատիկական մոդելներ, որոշված են գործընթացի պարամետրերի օպտիմալ լարքերը և օպերատորի ավտոմատացված աշխատանքային տեղի ֆունկցիաները:

**S.G. KYUREGHYAN, B.M. MAMIKONYAN, V.K. SHMELEV,
S.V. ABGARYAN, S.Sh. BALASSANYAN**

**ON FLOTATION PROCESS CONTROL PROBLEM FOR MOLYBDENUM
ORE DRESSING**

The technological process of flotation copper-molybdenum ore dressing in Kajaran concentrating mill is presented by multivariate object of control with distributed parameters. To organize automated process control, mathematical models are constructed, optimum adjustments of process parameters and functions of the operator's working place are determined.

В.В. БАГДАСАРЯН, В.В. АРУТЮНЯН

**ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ
ДЛЯ МОНИТОРИНГА И МЕНЕДЖМЕНТА МИГРАЦИОННЫХ
ПОТОКОВ**

Приведены динамическая модель и алгоритм решения задачи менеджмента миграционных потоков. Разработан алгоритм принятия решений для менеджмента процессов межрегиональной миграции.

Ключевые слова: динамическая модель, принятие решений, менеджмент, алгоритм.

Введение. В исследованиях [1-7] изучены статические модели миграционных процессов, позволяющие выявить, с одной стороны, основные факторы, обуславливающие миграцию населения, с другой - наличие сложных зависимостей между изучаемыми переменными. Следовательно, одним из направлений исследования и развития работ [1-7] является изучение динамических моделей миграции [8], позволяющих в значительной степени восполнить пробел, имеющийся в этой области. В настоящей работе рассматривается развитие результатов [8], основанное на динамической макроэкономической модели принятия решений для менеджмента миграционных потоков.

1. Постановка задачи и ее математическая модель. Рассмотрим экономику [7], состоящую из двух регионов А и В. Пусть А является регионом, принимающим мигрантов, а В – источником миграции. Известно, что причиной, обуславливающей миграцию, является “дифференциал заработной платы”. Согласно [1-7], основными факторами, от которых зависят спрос и предложение миграции, являются следующие:

$D_M(t)$ - величина спроса на мигрантов в принимающем регионе А в момент времени t , $t \in [t_0, T]$; $S_M(t)$ - величина предложения мигрантов в стране – источнике миграции в момент времени t , $t \in [t_0, T]$.

Эти два фактора, в свою очередь, зависят от:

W_i - уровня заработной платы в регионе P , $i \in \{A, B\}$; P – количества населения в регионе А; L – количества единиц труда в регионе А; I – внутреннего валового продукта (ВВП) в регионе А; $W = W_A - W_B$ – дифференциала заработной платы в регионах А и Б.

Определим следующие переменные:

$D_M/I = \varphi_1$ - величина спроса на мигрантов в регионе А, приходящаяся на одну единицу ВВП региона А; $\pi/w = \varphi_2$ - величина ВВП региона А, приходящаяся на одну единицу дифференциальной заработной платы; $w/L = \varphi_3$ - величина дифференциала заработной платы, приходящаяся на одну единицу труда в регионе А; $L/p = \varphi_4$ – количество единиц труда, приходящихся на одну единицу населения региона А; S_M/I

= ψ - величина предложения мигрантов региона В, приходящаяся на одну единицу ВВП региона А.

Пусть $\Delta(x) = \Delta x/x$, где Δx – изменение переменной x . Тогда, воспользовавшись уравнением Кая, можно предложить следующие два уравнения:

$$\Delta(D_M) = \Delta(D_M/I) + \Delta(I/w) + \Delta(w/L) + \Delta(L/P) + \Delta(P), \quad (1)$$

$$\Delta(S_M) = \Delta(S_M/I) + \Delta(I/w) + \Delta(w/L) + \Delta(L/P) + \Delta(P). \quad (2)$$

Приведем систему (1), (2) к виду

$$\begin{aligned} \Delta D_M = & \frac{I}{w} \cdot \Delta \frac{D_M}{I} w + L \frac{w}{L} \frac{D_M}{I} \Delta \frac{I}{w} + \frac{I L D_M P}{w P I} \Delta \frac{w}{L} + \\ & + \frac{I P D_M w}{w I L} \Delta \frac{L}{P} + \frac{\Delta P}{P} D_M, \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \Delta S_M = & \frac{I}{w} \Delta \frac{S_M}{I} w + L \frac{w}{L} \frac{S_M}{I} \Delta \frac{I}{w} + \frac{I L S_M P}{w P I} \frac{\Delta w}{L} + \\ & + \frac{I S_M w P}{w I L} \Delta \frac{L}{P} + \frac{\Delta P}{P} S_M. \end{aligned} \quad (4)$$

Система (3), (4) после деления на (t) и перехода к пределу при $\Delta t \rightarrow 0$ может быть приведена к виду

$$\dot{D}_M = \varphi_2 \dot{\varphi}_1 w + L \dot{\varphi}_2 \varphi_1 \varphi_3 + p(\dot{\varphi}_3 \varphi_1 \varphi_2 \varphi_4 + \dot{\varphi}_4 \varphi_1 \varphi_2 \varphi_3) + r_p D_M, \quad (5)$$

$$\dot{S}_M = \varphi_2 \psi w + L \dot{\varphi}_2 \psi \varphi_3 + p(\dot{\varphi}_3 \psi \varphi_2 \varphi_4 + \dot{\varphi}_4 \psi \varphi_2 \varphi_3) + r_p S_M. \quad (6)$$

Допущения. Мы будем предполагать, что переменные системы (5), (6) удовлетворяют следующим ограничениям:

$$\varphi_1 \leq \varphi_1^0; \varphi_2 \leq \varphi_2^0; \varphi_3 \leq \varphi_3^0; \varphi_4 \leq \varphi_4^0; \psi \leq \varphi^0, \quad (7)$$

где $\varphi_1^0, \varphi_2^0, \varphi_3^0, \varphi_4^0, \varphi^0$ - граничные величины.

Таким образом, мы получим динамическую макроэкономическую модель для менеджмента миграционных потоков (5)-(7).

2. Модель динамической задачи менеджмента миграционных потоков. В двухрегиональной экономике решением модели (5)-(7) является пара (w, L) , обеспечивающая выполнение балансового уравнения [7]:

$$S_m(w, L, P, I) = D_m(w, L, P, I) \quad (8)$$

для заданных значений P и I .

Задачи менеджмента миграционных потоков классифицируются в соответствии с их целями и сводятся к:

а) выбору оптимальных управлений и определению соответствующих им траекторий, описывающих динамику изменения спроса (предложения) на труд мигрантов;

б) решению задачи принятия решений для менеджмента межрегиональной миграции.

Отсюда мы приходим к формулировке следующих трех основных этапов, связанных с принятием решений для менеджмента миграционных потоков:

1. Обоснование основных макроэкономических данных построения модели менеджмента миграционных потоков и выбора критерия эффективности в задаче решения балансовых уравнений.
2. Определение области допустимых решений (ОДР) в соответствии с системой ограничений.
3. Анализ и оценка вариантов определения оптимальных решений и ОДР и выбор наилучших траекторий и вектора управления.

Параметры спроса и предложения труда мигрантов D_M и S_M зависят от вектора управлений

$$(\varphi_1(t), \varphi_2(t), \varphi_3(t), \varphi_4(t)) = \varphi(t), t \in [t_0, T] \quad (9)$$

и вектора переменных

$$a(t) = (w(t), L(t)P(t), I(t)), t \in [t_0, T] \quad (10)$$

с начальными условиями

$$a(t_0), \varphi(t_0).$$

Пусть отрезок времени $[t_0, T]$ разбит на интервалы

$$\Delta = \{t_0 < t_1 < \dots < t_s < t_{s+1} < \dots < t_q = T\}. \quad (11)$$

Допустимые управления. Допустимыми управлениями принятия решений для менеджмента миграционных потоков называем вектор-функцию

$$\varphi(t) = (\varphi_1(t), \varphi_2(t), \varphi_3(t), \varphi_4(t), \varphi_5(t)), t \in [t_0, T] \quad (12)$$

(где $\varphi_5(t) = \psi(t)$), выбираемую из класса всех измеримых на отрезке $[t_0, T]$ вектор-функций, удовлетворяющих в каждый момент времени $t \in [t_0, T]$ условиям

$$\varphi_i(t) \in \Phi_i \subset R, \quad (13)$$

где Φ_i - компактные множества из R , называемые множествами управляющих параметров задачи принятия решений для менеджмента миграционных потоков.

Допустимые стратегии. В задаче принятия решений для менеджмента миграционных потоков выбор стратегий управления осуществляется в зависимости от имеющейся информации о состоянии миграционного процесса. В рассматриваемой нами динамической системе информационное состояние миграционного процесса определяется в каждый момент времени $t \in [t_0, T]$ фазовым вектором $(D_M(t), S_M(t)) = x(t)$ и временем $t - t_0$ с момента t_0 . Под стратегией выбора решений для менеджмента миграционных процессов будем понимать правило, которое ставит в соответствие каждому фиксированному информационному состоянию определенное управление из множества его допустимых управлений. Определенную таким образом стратегию обозначим через

$$V(\cdot) = \{(\varphi_1(\cdot), \varphi_2(\cdot), \varphi_3(\cdot), \varphi_4(\cdot), \varphi_5(\cdot))\}. \quad (14)$$

Стратегия $V(\cdot)$ называется допустимой, если для каждого набора $V(\cdot)$ существует единственное решение системы дифференциальных уравнений (5), (6) с начальными условиями (7), продолжимое на отрезок $[t_0, T]$.

Пусть $Z[t_s^\Delta, t_{s+1}^\Delta]$ – множество допустимых управлений для принятия решений по менеджменту миграционных потоков в суженной области определения $(t_s^\Delta, t_{s+1}^\Delta)$, $S = 0, 1, \dots, q-1$.

Определение. Пара (Δ, a) , где $a = (a_0, \dots, a_q)$; $a_s, S = 0, \dots, q$ – отображение, ставящее в соответствие моменту времени t_s^Δ и состоянию $(D_M(t_s^\Delta), S_M(t_s^\Delta))$ допустимое управление $\varphi(t) \in Z(t_s^\Delta, t_{s+1}^\Delta)$, называемое кусочно-программной стратегией для менеджмента миграционных потоков. Здесь $(D_M(t_s^\Delta), S_M(t_s^\Delta))$ – сечение траектории $(D_M(\cdot), S_M(\cdot))$ в момент времени t_s^Δ , $s=0, 1, \dots, q$.

Отметим, что разбиение Δ определяет стратегию для менеджмента миграционного потока. Следовательно, разбиение Δ может быть различным для каждой стратегии. Если в определении кусочно-программной стратегии допустимое управление $v(\cdot)$ – линейная функция, то соответствующая ей стратегия называется кусочно-линейной программной стратегией.

Целевая функция. Пусть в конце планового периода T запланированы значения спроса и предложения мигрантов D_M, S_M . Положим, расстояние между текущими значениями спроса и предложения $D_M(t), S_M(t)$ в момент времени $t \in [t_0, T]$ и планируемыми значениями D_M, S_M равным

$$d((D_M, S_M), (D_M(t), S_M(t))) = \sqrt{(D_M - D_M(t))^2 + (S_M - S_M(t))^2}. \quad (15)$$

Тогда критерий оптимальности можно определить в виде

$$d((D_M, S_M), (D_M(t), S_M(t))) \rightarrow \min, \quad (16)$$

где \min берется по вектору $\varphi(t)$ управлений и вектору параметров $a(t)$ в каждый момент времени $t \in [t_0, T]$.

Отсюда получим динамическую задачу (5)-(7), (16) менеджмента миграционных потоков, обеспечивающую в каждый момент времени $t \in [t_0, T]$ сближение вектор - функций $x(t) = (D_m(t), S_m(t))$, $t \in [t_0, T]$ с точкой (D_M, S_M) фазового пространства векторов R^2 .

3. Алгоритм решения задачи (5)-(7), (16). Пусть в точке t_s^Δ имеем $\varphi_i(t_{s+1}^\Delta) = \varphi_i(t_s^\Delta) + \Delta\varphi_{i,s+1}$, где $\Delta\varphi_{i,s+1}$ – приращение функции $\varphi_i(t)$, $i = 1, 2, \dots, 5$ соответственно. Запишем систему (5), (6) в виде

$$D_M(t_{s+1}^\Delta)(1 - r_p) = \varphi_2 \dot{\varphi}_1 w + L \dot{\varphi}_2 \varphi_1 \varphi_3 + P(\dot{\varphi}_3 \varphi_1 \varphi_2 \varphi_4 + \dot{\varphi}_4 \varphi_1 \varphi_2 \varphi_3), \quad (17)$$

$$S_M(t_{s+1}^\Delta)(1 - r_p) = \varphi_2 \dot{\varphi}_5 w + L \dot{\varphi}_2 \varphi_5 \varphi_3 + P(\dot{\varphi}_3 \varphi_5 \varphi_2 \varphi_4 + \dot{\varphi}_4 \varphi_5 \varphi_2 \varphi_3), \quad (18)$$

$$\dot{\varphi}_i(t_{s+1}^0) = \frac{\Delta\varphi_i(t_{s+1}^\Delta)}{\Delta t_{s+1}^\Delta}, \quad i = 1, \dots, 5, \quad r_p(t_{s+1}^\Delta) = r_p(t_s^\Delta) + \Delta r_p.$$

Тогда алгоритм решения задачи (5)-(7), (16) можно записать при помощи следующей последовательности шагов:

Шаг i :

$$\Delta\varphi_{i,S+1}(\Delta r_p(t_{S+1}^\Delta) = \begin{cases} \lambda Q, \text{ если } d((D_M, S_M), (D_{M,S+1}, S_{S+1})) < d(D_M, S_m), (D_{M,S}, S_{M,S})), \\ -\Delta\varphi_{i,S}(-\Delta r_p(t_S^\Delta)) - \text{ в противном случае,} \end{cases}$$

где Q – длина рабочего шага в пространстве параметров; $($ – очередная реализация случайного вектора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Benham L., Maurizi and Reder M.W.** Migration, Location and Remuneration of Medical Personnel // Physicians and Dentists. Review of Economics and Statistics. –1968. - V.50. - P. 332-347.
2. **Bunting R.L.** A test of the Theory of Geographic Mobility // Industrial and Labor Relations Review. – 1961.- V.15. - P.75-82.
3. **Cebuba R.J.** On International and Interregional Capital Transfers // Missisipi Valley Journal of Business and Economics. – 1972. – V.7. - P. 70-75.
4. **Cebula R.J. and Vedler R.K.** A Note on Migration Economic Opportunity and Quality of life // Journal of Regional Science . – 1973. – V.13. – P.205-211.
5. **Cebula R.J., Kohu R. and Vedder R.K.** Some Determinants of Black Interstate Migratio, 1965-1970 // Western Economic Journal. – 1973.- V. 11.- P.500-505.
6. **Chapin G.L., Vedder R.K. and Gallaway L.E.** The Determinants of Emigration of South Africa, South African. Journal of Economics. – 1965. – 1967. - V. 38. - P. 374-381.
7. **Багдасарян В.В., Арутюнян В.В.** Моделирование межрегиональной миграции и анализ уровня заработной платы // Моделирование, оптимизация, управление: Сб. научных трудов. - 2001. - С. 35-42.
8. **Baghdassaryan V.V.** Modeling of population dynamics // Proceedings Conferense DSS. - Melbourn, Australia. – 1999. - P. 7-8.

Ванадзорский государственный педагогический институт. Материал поступил в редакцию 05.03. 2001.

Վ.Վ. ԲԱԴԴԱՍԱՐՅԱՆ, Վ.Վ. ՀԱՐՈՒԹՅՈՒՆՅԱՆ

**ՄԻԳՐԱՑԻՈՆ ՀՈՍՔԵՐԻ ՄՈՆԻԹՈՐԻՆԳԻ ԵՎ
ՄԵՆԵՋՄԵՆԹԻ ՈՐՈՇՈՒՄՆԵՐԻ ԸՆԴՈՒՄԱՆ
ԴԻՆԱՄԻԿ ՄՈԴԵԼԸ**

Տրվում է շրջանային միգրացիոն հոսքերի մոնիթորինգի և մենեջմենթի որոշումների ընդունման դինամիկ մոդել, որի լուծման համար մշակված է ալգորիթմ և բերված է լավարկման չափանիշը:

V.V. BAGHDASARYAN, V.V. HARUTYUNYAN

**DYNAMIC MODEL OF DECISION MAKING FOR THE
MONITORING AND MANAGEMENT
OF MIGRATION FLOWS**

The dynamic model of decision making for the monitoring and management of migration flows is presented. The criteria of optimization and the algorithm of the solution of developed model are given.

А.Г. СААКЯН

ОБ ОДНОМ МЕТОДЕ РЕШЕНИЯ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ ЗАДАЧИ ПРИНЯТИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ РЕШЕНИЙ

Рассматривается многокритериальная задача принятия оптимальных решений (МДЗПОР). Разнообразные данные в коммерции, экономике, социологии и технике поступают в виде многомерных образов, в которых наблюдения зависят от времени [1, 2]. Моделирование ситуаций, описываемых в виде многомерных динамических образов, обуславливает необходимость решения задач многокритериальной динамической оптимизации. С одной стороны, применение методов моделирования, основанных на использовании моделей задач многокритериальной оптимизации, позволяет описать состояние объекта в зависимости от времени, с другой - обуславливает необходимость решения проблем, связанных с доказательством существования оптимальных решений задачи многокритериальной динамической оптимизации, чему и посвящена данная работа.

Ключевые слова: многокритериальная оптимизация, аппроксимация, кусочно-параболическая стратегия.

1. Определения и обозначения

1.1. Определение МДЗПОР.

Пусть заданы:

система уравнений движения

$$\dot{x}(t) = f(x(t), u(t), t), \quad (1)$$

система ограничений

$$G_1(x(t)) \leq b_1, \quad l = 1, 2, \dots, r, \quad (2)$$

заданных в сегменте $[t_0, T]$,

система критериев

$$\min_{u(t)} d((x_\xi(t))_{\xi=1, \dots, k}, (M_\xi)_{\xi=1, \dots, k}) = \min_{u(t)} \sqrt{\sum_{\xi=1}^k (x_\xi(t) - M_\xi)^2} \quad (3)$$

для любого $t \in [t_0, T]$.

Краевые условия:

$$x(t_0) = x_0, \quad (4)$$

где $x(t) = (x_1(t), x_2(t), \dots, x_k(t))$ - вектор состояния системы;

$u(t) = (u_1(t), u_2(t), \dots, u_m(t))$ - вектор управления системы, $t \in [t_0, T]$.

1.2. Определения и обозначения из теории сплайнов

Пусть $C^k[t_0, T]$ - множество непрерывных на $[t_0, T]$ функций, имеющих непрерывные производные k -го порядка, $k \geq 0$, $x(t), u(t) \in C[t_0, T]$ и заданы множества узлов:

$$\begin{aligned} \Delta_n &= t_0 < t_1 < t_2 < \dots < t_n = T, \quad n \geq 2, \\ \Delta'_n &= t_0 < \bar{t}_1 < \bar{t}_2 < \dots < \bar{t}_n < \bar{t}_{n+1} = T. \end{aligned} \quad (5)$$

Пусть P_2 – множество полиномов второй степени.

Определение. Функция $a(g, t)$ называется интерполяционным параболическим сплайном для функции $g(t)$, если

- а) $a(g, t) \in P_2, t \in (\bar{t}_i, \bar{t}_{i+1}), i = 0, 1, \dots, n$; б) $a(g, t) \in C^2[t_0, T]$;
в) $a(g_i, t_i) = g(t_i), i = 0, 1, \dots, n$.

Сплайн $a(g, t)$ называется $(T-t_0)$ – периодическим, если он удовлетворяет следующим условиям:

$$\text{г) } a^{(k)}(g, t_0) = a^{(k)}(g, T), \quad k = 1, 2. \quad (6)$$

В общем случае [3] наиболее применительными являются следующие краевые условия:

$$\text{д) } a'(g, t_0) = a_n, a'(g, T) = b_n; \quad (7)$$

$$\text{е) } a''(g, t_0) = A_n, a''(g, T) = B_n; \quad (8)$$

$$\text{ж) } a''(g, z - t_0) = a''(g, z - a), \quad z = x_i, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (9)$$

где a_n, b_n, A_n, B_n являются заданными числами.

Положим,

$$m_i = a'(g, t_i), \quad M_i = a''(g, t_i), \quad h_i = t_{i+1} - t_i,$$

$$\bar{h}_i = t_{i+1} - \bar{t}_{i+1}, \quad \bar{t}_i = \frac{t_{i+1} - t_i}{2}, \quad i = 0, 1, \dots, n. \quad (10)$$

Пусть $0 < \bar{h}_i < h_i, i = 0, 1, \dots, n-1, n > 2$. Тогда интерполяционные параболические сплайны для функций $x_i(t), i = 1, \dots, k, u_j(t), j = 1, \dots, m$, удовлетворяющие одному из краевых условий (6)-(9), в силу теоремы 1 ([3], с.35) существуют и определяются следующим единственным образом.

Положим $m_{i\xi} = S'_{2\xi}(t_i), M_{i\xi} = S''_{2\xi}(t_i), m_{i\eta}^{(2)} = V'_{2\eta}(t_i), M_{i\eta}^{(2)} = V''_{2\eta}(t_i), i = 0, 1, \dots, n, \eta = 1, 2, \dots, m, \xi = 1, 2, \dots, K$. Тогда для $t \in [t_i, t_{i+1}], i = 1, 2, \dots, n-1$ сплайны для функций $x_\xi(t)$ и $u_\eta(t), \xi = 1, 2, \dots, K, \eta = 1, 2, \dots, m$ допускают следующие представления:

$$S_{2\xi}(t) = x_\xi(t_i) + m_{i\xi}^{(1)}(t - t_i) + c_{i\xi}^{(1)}(t - t_i)^2 + d_{i\xi}^{(1)}(t - \bar{t}_{i+1})_+^2,$$

$$V_{2\eta}(t) = u_\eta(t_i) + m_{i\eta}^{(2)}(t - t_i) + c_{i\eta}^{(2)}(t - t_i)^2 + d_{i\eta}^{(2)}(t - \bar{t}_{i+1})_+^2$$

соответственно, где $(t - \bar{t})_+^m = [\max(0, t - \bar{t})]^m$.

2. Формулировка основных понятий

Всюду далее будем использовать понятия и обозначения:

а) из [3]: определение интерполяционного сплайна, модуль непрерывности функции, условия Липшица, краевые условия;

б) из [4]: допустимые управления лица, принимающего решение (ЛПР), допустимые стратегии ЛПР, стратегия ЛПР, кусочно-программная стратегия ЛПР.

Если в определении кусочно-программной стратегии ЛПР допустимое управление $u(t)$ - параболическая функция, то стратегия называется кусочно-параболической.

3. Решение задачи

Решение задачи (1)-(4) будет основано на применении алгоритма случайного поиска [5-7] и сплайн-параболической аппроксимации оптимальной кусочно-программной стратегии [3-7].

Пусть в точке t_{i+1} имеем $u_{\eta}(t_{i+1}) = u_{\eta}(t_i) + \Delta u_{\eta}(t_{i+1})$,

где $\Delta u_{\eta}(t_{i+1})$ - приращение управления $u_{\eta}(t)$, $\eta = 1, 2, \dots, m$, $i = 0, 1, \dots, n$.

Положим,

$$x_{\xi}(t_{i+1}) = x_{\xi}(t_i) + f_{\xi}(x(t_i), u(t_{i+1}))\Delta t_{i+1}, \quad (11)$$

где $\xi = 1, 2, \dots, k$, $i = 0, 1, \dots, n-1$.

Известно [5-6], что если производится L выборок случайных точек, то вероятность попадания хотя бы одной точки в заданную Δ - окрестность оптимума равна $P_{\Delta}(L) = 1 - (1 - \Delta^n)^L$. Отсюда $L \approx \frac{\ln(1 - P_{\Delta}(L))}{\ln(1 - \Delta^n)}$.

Определим условие A : $d(x(t_{i+1}), M) < d(x(t_i), M)$. Тогда общий шаг можно сформулировать следующим образом. Определяем

$$\Delta u_{\eta}(t_{i+1}) = \begin{cases} \alpha\beta_{\eta}, \eta = 1, \dots, m, & \text{если выполнены условия (2) и } A, \\ -\Delta u_{\eta}(t_i) & \text{в противном случае,} \end{cases}$$

$i = 0, 1, \dots, n-1$.

Если выполнены условия (2) и A , то положим

$$x_{\xi}(t_{i+1}) = x_{\xi}(t_i) + f(x(t_{i+1}), u(t_{i+1}), t)\Delta t_{i+1}.$$

Если $d(x(t_{i+1}), M) < d(x(t_i), M)$, то переходим к следующей точке t_{i+2} . В противном случае полагаем $\Delta u_{\eta}(t_{i+1}) = -\Delta u_{\eta}(t_i)$, $\eta = 1, \dots, m$ и повторяем этот шаг.

Для практических целей количество шагов s для каждого интервала разбиения $[t_i, t_{i+1})$ берется равным размерности k вектора:

$$x(t) = (x_{\xi}(t_{i+1}))_{\xi=1,\dots,k} \quad [5,6].$$

Пусть нами получены точки $(x_{\xi}(t_{i+1}))_{\xi=1,\dots,k}$ и $(u_{\eta}(t_i))_{\eta=1,\dots,m}$, $i = 0, 1, \dots, n-1$. Тогда из допущения 1 следует существование кусочно-параболических сплайн-аппроксимаций траекторий и управлений.

Пример.

Рассмотрим задачу [8] в следующей постановке:

а) система уравнений движения задана в виде

$$\begin{aligned} \dot{x}_1(t) &= x_2(t), \\ \dot{x}_2(t) &= u(t); \end{aligned} \quad (12)$$

б) система ограничений

$$3 - |x_1(t)| \geq 0, |u(t)| \leq 1; \quad (13)$$

в) начальные условия

$$x_1(0) = 1, x_2(0) = 0; \quad (14)$$

г) время $t \in [0, T]$.

Пусть на плоскости заданы точки $(M_1, M_2) = (2, 1)$. Под оптимальной траекторией будем понимать траекторию $\{x(t) = (x_1(t), x_2(t)), t \in [0, T]\}$, удовлетворяющую системе ограничений (13), являющуюся решением (12) и удовлетворяющую требованию

$$\min_{u(t)} \sqrt{\sum_{i=1}^2 (x_i(t) - M_i)^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^2 (x_i(t) - M_i)^2}. \quad (15)$$

Решение задачи (12) - (15)

Разобьем отрезок $[0, T]$ на n частей

$$0 = t_0 < t_1 < \dots < t_i < t_{i+1} < \dots < t_{n-1} = T,$$

где $t_i = \frac{i \times T}{n-1}, i = 0, 1, \dots, n-1, \Delta t_i = t_{i+1} - t_i = \frac{T}{n}, i = 0, 1, \dots, n-1$.

Положим $u(0) = \Delta u(0) = 0$. Пусть α - шаг. В качестве случайных чисел рассмотрим сгенерированную в соответствии с алгоритмом [9] последовательность: $\beta_1 = 0,137; \beta_2 = 0,27; \beta_3 = 0,8; \beta_4 = 0,29; \beta_5 = 0,4; \beta_6 = 0,6; \beta_7 = 0,48, \dots$

Решим следующую задачу.

Задача. Определить величину шага α и количество точек разбиения n , достаточные для решения задачи (12)-(15).

Определим условие А: $d(x(t_{i+1}), M) < d(x(t_i), M)$.

Определим общий шаг:

$$\Delta u(t_i) = \begin{cases} \alpha \beta_i, & \text{если выполнено условие А,} \\ -\Delta u(t_{i-1}) & \text{в противном случае,} \end{cases} \quad (16)$$

При выполнении условия А положим

$$u(t_i) = u(t_{i-1}) + \Delta u(t_i) = \sum_{j=1}^i \Delta u(t_j) \leq 1, j=1,2,\dots,n-1.$$

Отсюда

$$x_2(t_i) = \left(\sum_{k=1}^i \sum_{j=1}^k \Delta u(t_j) \right) \Delta t, \quad (17)$$

$$x_1(t_i) = \left[\sum_{k=1}^i \sum_{j=1}^k \Delta u(t_j) + \sum_{k=1}^{i-1} \sum_{j=1}^k \Delta u(t_j) \right] (\Delta t)^2 \leq 3.$$

Из (13),(16) следует

$$u(t_i) = \alpha \sum_{j=1}^i \beta_j \leq 1, i=1,2,\dots,n-1, \quad (18)$$

$$x_2(t_i) = \frac{T}{n} \times \alpha \sum_{k=1}^i \sum_{j=1}^k \beta_j. \quad (19)$$

Отсюда и из (17) следует:

$$x_1(t_i) = \left(\frac{T}{n} \right)^2 \alpha \left[\sum_{k=1}^i \sum_{j=1}^k \beta_j + \sum_{k=1}^{i-1} \sum_{j=1}^k \beta_j \right] \leq 3. \quad (20)$$

Из (18) следует

$$x_1(t_i) = \left(\frac{T}{n} \right)^2 \left[\sum_{k=1}^i \sum_{j=1}^k \alpha \beta_j + \sum_{k=1}^{i-1} \sum_{j=1}^k \alpha \beta_j \right] \leq \left(\frac{T}{n} \right)^2 [i+i-1] \leq (2i-1) \left(\frac{T}{n} \right)^2.$$

Таким образом, для выполнения условия (13) достаточно, чтобы имело

$$\text{место } (2i-1) \left(\frac{T}{n} \right)^2 \leq 3 \text{ или } i \leq \frac{1}{2} \left(3 \left(\frac{n}{T} \right)^2 + 1 \right).$$

Шаг α должен удовлетворять условию

$$\alpha \leq \min \left\{ \frac{1}{\sum_{j=1}^i \beta_j}, 3 \left(\frac{n}{T} \right)^2 / \left[\sum_{k=1}^i \sum_{j=1}^k \beta_j + \sum_{k=1}^{i-1} \sum_{j=1}^k \beta_j \right] \right\}.$$

Отсюда, если $\frac{n}{T} = 1$, то $i = 2$; если $\frac{n}{T} = 2$, то $i = 6$; если $\frac{n}{T} = 3$, то $i = 14$.

Пример, если $\frac{n}{T} = 1$, то $i = 2$. Отсюда

$$\alpha \leq \min \left\{ \frac{1}{\beta_1 + \beta_2}, 3 / (2\beta_1 + \beta_2) \right\} = \min \{2,46; 5,51\} = 2,46.$$

Следовательно,

$$u(t_1) = \alpha \beta_1 = 0,34; \quad u(t_2) = \alpha(\beta_1 + \beta_2) = 1; \quad x_2(t_1) = 2,46 \times 0,137 = 0,34;$$

$$x_1(t_1) = 2,46 \times 0,137 + 1 = 1,34; \quad x_2(t_2) = 2,46(2\beta_1 + \beta_2) = 1,34;$$

$$x_1(t_2) = 2,46(3\beta_1 + \beta_2) = 1,68 .$$

$$\text{Тогда } d(x(t_1), M) = \sqrt{(2 - 1,34)^2 + (1 - 0,34)^2} = 0,93 ;$$

$$d(x(t_2), M) = \sqrt{(2 - 1,68)^2 + (1 - 1,34)^2} = \sqrt{0,1 + 0,12} = 0,32 .$$

Отсюда $d(x(t_2), M) \leq d(x(t_1), M)$.

Решение:

$$u(t_0) = 0, \quad u(t_1) = 0,34, \quad u(t_2) = 1;$$

$$x_1(t_0) = 1, \quad x_1(t_1) = 1,34, \quad x_1(t_2) = 1,68;$$

$$x_2(t_0) = 0, \quad x_2(t_1) = 0,34, \quad x_2(t_2) = 1,34 .$$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Fair R.C.** The effect of economics events on votes for president // The Review of Economics and Statistics. May 1978.-V. LX, № 2.- P. 159-173.
 2. **Fracisco A., Meltzer A.** The effect of Aggregate Economic Variables in Congressional Elections//The American Political Science Review 69 (Dec. 1975 a).-P-1232-1239.
 3. **Стечкин С.Б., Субботин Ю.Г.** Сплайны в вычислительной математике.- М.:Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1976.-284 с.
 4. **Петросян Л.А., Данилов Н.Н.** Кооперативные дифференциальные игры и их приложения. – Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1985.-276 с.
 5. **Растринин Л.А.** Статические методы поиска.-М.: Наука, 1968.-376 с.6. Растринин Л.А. Случайный поиск в задачах оптимизации многопараметрических систем. – Рига: Знание, 1965.-190 с.
 6. Թերզյան Հ.Ս. Ավտոմատացված նախագծման համակարգերի տեսություն: Երևան, Լուսինջեղի, Արենք, 1995.- 433 էջ:
 7. **Саликвадзе М.Е.** Задачи векторной оптимизации в теории управления.-Тбилиси: Мецниереба, 1975.- 201 с.
 8. **Голенко Д.И.** Моделирование и статистический анализ псевдослучайных чисел на вычислительных машинах.-М.: Физматгиз, 1965.- 227с
- ГИУА. Материал поступил в редакцию 05.05.2002.

Հ.Գ. ՍԱՀԱԿՅԱՆ

ՕՊՏԻՄԱԼ ՈՐՈՇՈՒՄՆԵՐԻ ԸՆԴՈՒՆՄԱՆ ԲԱԶՄԱԿՐԻՏԵՐԻԱԼ ԴԻՆԱՄԻԿ ԽՆԴԻ ԼՈՒԾՄԱՆ ՄԻ ՍԵԹՈՂԻ ՄԱՍԻՆ

Աշխատանքը նվիրված է օպտիմալ որոշումների ընդունման բազմակրիտերիալ դինամիկ խնդրի լուծման մեթոդի մշակմանը: Սահմանվում են քառակուսային կտոր առ կտոր ծրագրային ստրատեգիաները և մշակվում այդ ստրատեգիաների կառուցման ալգորիթմերը:

H.G. SAHAKYAN

ON THE METHOD OF DYNAMIC MULTIPLE CRITERIA OPTIMAL DECISION MAKING PROBLEM SOLUTION

The method of the solution of Dynamic multiple criteria optimal decision making problem is considered. The concept of the piecewise quadratic programmable strategies is defined and algorithms of those strategies are developed.

УДК.621.315.592

В.А. АРУТЮНЯН, Ш.Е. БОЗОЯН, А.А. КОЧАРЯН

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ПРИМЕСЕЙ В ОПТИЧЕСКИ ПРОЗРАЧНЫХ РАСТВОРАХ

Представлен обобщенный метод определения концентрации примесей в оптически прозрачных растворах оптоэлектронным способом. Метод предполагает аддитивность присутствующих в растворе примесей.

Ключевые слова: оптически прозрачные вещества, фотоотклик, фотоприемники, аддитивное свойство примесей.

Существуют различные способы определения концентрации примесей в оптически прозрачных растворах (ОПР) [1]. Однако все они позволяют определять концентрацию только одной примеси в растворе, а приборы, используемые при этом, относительно сложны. В [2] приведен способ определения концентрации примесей для случая, когда зависимость фотоотклика при прохождении сигнала через раствор является линейной функцией от концентрации примесей. В данной работе описывается более обобщенный подход к решению данной проблемы.

Допустим, что имеем оптически прозрачную среду (ОПС), к которой примешиваем одну определенную примесь. В этом случае, пропуская через ОПС электромагнитное излучение Φ определенной длины волны λ_i , на выходе преобразователя (фотоприемника) получим сигнал $I_{0,i}$. При примешивании примеси А изменяется амплитуда сигнала из-за изменения стехиометрического состава раствора. Это измененное значение мы обозначим через $I_{1,i}$. В результате получим разность сигналов, равную $\Delta I_i = I_{0,i} - I_{1,i}$. На рис. 1 схематически показано образование разности интенсивностей на выходе фотоприемника при примешивании m типов примесей.

При наличии примесей изменение сигнала на выходе будет равно

$$\Delta I_{(1,\dots,m),i} = \Delta I_{1,i} + \dots + \Delta I_{m,i}. \quad (1)$$

Это применительно для простых примесей, обладающих свойством аддитивности.

Принимается, что изменение фототока пропорционально концентрации (X_j) примеси в растворе

$$\Delta I_{j,i} = K_{j,i} X_j, \quad (2)$$

где $K_{j,i}$ – коэффициент пропорциональности, имеющий разные значения для разных примесей.

Экспериментально измеряя значения $\Delta I_{j,i}$ и зная концентрации примесей, можно вычислить коэффициент пропорциональности для каждой примеси

$$K_{j,i} = \Delta I_{j,i} / X_j, \quad i, j = 1, \dots, m. \quad (3)$$

$$\begin{cases} \Delta I_{(1,\dots,m),1} = K_{1,1}X_1 + K_{2,1}X_2 + \dots + K_{m,1}X_m, \\ \Delta I_{(1,\dots,m),2} = K_{1,2}X_1 + K_{2,2}X_2 + \dots + K_{m,2}X_m, \\ \dots \\ \Delta I_{(1,\dots,m),m} = K_{1,m}X_1 + K_{2,m}X_2 + \dots + K_{m,m}X_m. \end{cases} \quad (5)$$

Решая систему уравнений (5), получим значения X_1, X_2, \dots, X_m .

Применительно к определению концентрации конкретных примесей это означает, что количество длин волн, используемых для определения концентрации примесей, должно быть равно количеству примесей.

Рассмотрим более общий случай, когда оптически прозрачное вещество В состоит из вещества B_i ($i = 1, \dots, n$) с неизвестными соотношениями X_i ($\sum_{i=1}^n X_i = 1$) соответственно. В свою очередь, каждое вещество B_i с известными соотношениями Y_{ij} ($j = 1, \dots, m$) состоит из «элементарных» (попарно независимых) веществ A_j ($j = 1, \dots, m$) соответственно (рис. 2).

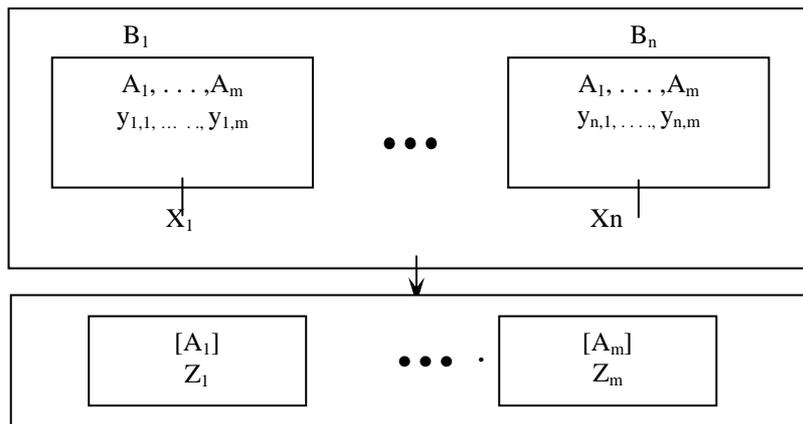


Рис. 2. Схема определения концентрации примесей в общем случае

Задачу определения концентрации X_i ($i = 1, \dots, n$) примесей в этом случае можно решить двумя этапами. Сначала вещество В представляется как совокупность веществ A_j ($j = 1, \dots, m$), и задача относительно веществ A_1, \dots, A_m решается уже рассмотренным методом. В результате получаются значения концентраций Z_1, \dots, Z_m для A_1, \dots, A_m соответственно. Затем, подставляя эти значения в систему уравнений

С.К. КОЧАРЯН

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СЖАТИЯ ПО
СТАНДАРТУ MPEG-2**

Представлена модель процессов сжатия по стандарту MPEG-2. Дано описание моделей предварительной обработки сигнала, межкадрового сжатия и внутрикадрового сжатия.

Ключевые слова: моделирование, сжатие видеoinформации, MPEG-2.

За последние несколько лет широкое распространение получило цифровое телевидение, возникли несколько стандартов цифрового ТВ: DVB (Digital Video Broadcasting), ATSC (Advanced Television System Committee) [1]. Всех их объединяет то, что в качестве способа сжатия видеосигнала используется стандарт MPEG-2. Наряду с очевидными преимуществами цифрового представления видеосигнала в сравнении с аналоговым (помехозащищенность, высокое качество, более широкие возможности обработки и т.д.), возникли новые задачи, одной из которых является оценка качества сжатия видеосигнала. С целью изучения искажений, возникающих при сжатии видеoinформации, и разработки тестовых изображений возникла необходимость создания модели процессов сжатия, используемых в стандарте MPEG-2. В разработанной модели процесс обработки видеосигнала разделен на три шага:

1. **Обработка сигнала**
 - а) низкочастотная фильтрация и “размытие” сигнала;
 - б) переход из цветового пространства RGB в YCrCb и обратно;
 - в) преобразование формата цветности 4:4:4 в формат 4:2:2 или 4:2:0 и восстановление первичной частоты дискретизации цветоразностных сигналов.
2. **Межкадровое сжатие**
 - а) расчет вектора движения для каждого макроблока;
 - б) расчет разностных кадров.
3. **Внутрикадровое сжатие**
 - а) дискретно-косинусоидальное преобразование (ДКП);
 - б) квантование и восстановление ДКП коэффициентов;
 - в) Z упорядочивание и кодирование по алгоритму Хаффмана [2].

Искажения видеосигнала, обусловленные сжатием, возникают из-за межкадрового и внутрикадрового сжатий. Отметим, что в некоторых случаях искажения одного вида могут усилить или даже сгенерировать искажения другого вида, ввиду чего необходимо рассмотреть процессы сжатия как отдельно, так и в совокупности. На рис. 1 приведена схема модели с параллельным и последовательным прохождением сигнала.

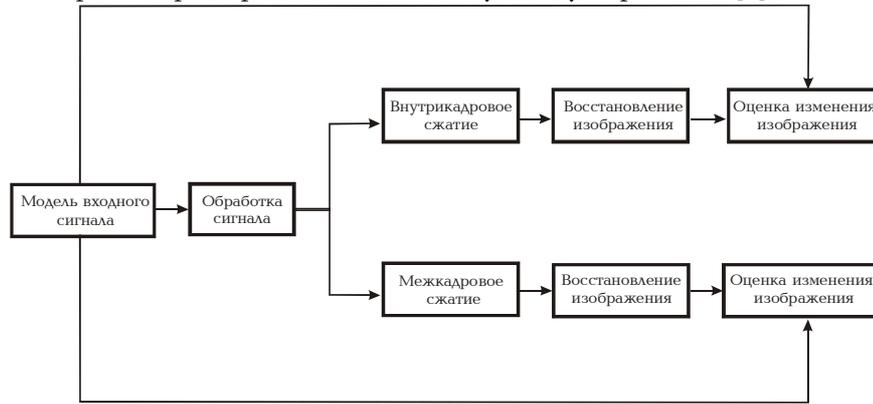
Для полной оценки адекватности модели и реальных программ были реализованы также Z упорядочивание и кодирование по алгоритму Хаффмана, а также разработана модель входного сигнала.

Ниже приведено более детальное описание модели.

Обработка сигнала

а) Низкочастотная фильтрация и “размытие” сигнала

Для НЧ фильтрации входной сигнал подвергается преобразованию Фурье и подвергается фильтрации согласно следующему выражению [3]:



а)



б)

Рис.1. Схема модели процессов сжатия видеосигнала по стандарту MPEG-2:

а – параллельное прохождение сигнала; б – последовательное прохождение сигнала

$$G(u,v)=H(u,v)F(u,v), \tag{1}$$

где $F(u,v)$ - коэффициенты преобразования Фурье для изображения; $H(u,v)$ - коэффициент передачи фильтра; $G(u,v)$ - выходной сигнал.

В модели использованы два значения функции $H(u,v)$:

$$H(u,v) = \left\{ \begin{array}{l} 1 \dots \dots \dots \text{if } \dots D(u,v) \leq D_0 \\ 0 \dots \dots \dots \text{if } \dots D(u,v) > D_0 \end{array} \right\}, \tag{2}$$

$$H(u,v) = e^{-[D(u,v) / D_0]^n}, \tag{3}$$

где D_0 - частота среза, а $D(u,v)$ определяется выражением

$$D(u,v) = \{u^2 + v^2\}^{1/2}. \tag{4}$$

Выражение (2) описывает коэффициент передачи для идеального фильтра, а (3) - для фильтра с гауссовым или экспоненциальным коэффициентом передачи.

Изображение подвергается “размытию” по следующему выражению:

$$g(x, y) = \left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{M} \sum_{(m,n) \in S} f(m,n) \dots \dots \text{if } \left| f(x, y) - \frac{1}{M} \sum_{(m,n) \in S} f(m,n) \right| > T \\ f(x, y) \dots \dots \dots \text{otherwise} \end{array} \right\}, \quad (5)$$

где $g(x,y)$ - выходное значение пиксела; $f(m,n)$ - начальное значение пиксела; S - диапазон координат соседних пикселей (без $f(x,y)$); M - количество пикселей в диапазоне S ; T - положительное числовое значение.

б) *Переход из цветового пространства RGB в YCrCb и обратно.*

В системах цифрового телевидения при восьмибитном кодировании сигнала значения 0 и 255 используются для передачи сигналов синхронизаций [2]. Принимая во внимание, что в компьютерной графике не требуется использовать сигналы синхронизации, матрицы преобразования RGB в YCrCb и обратно YcrCrb в RGB [2,4] приведены к виду

$$\begin{pmatrix} Y \\ C_B \\ C_R \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 16 \\ 128 \\ 128 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0,2568 & 0,504 & 0,0979 \\ -0,1482 & -0,291 & 0,4392 \\ 0,4392 & -0,678 & -0,0714 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix}, \quad (6)$$

$$\begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1,164382 & 0 & 1,596043 \\ 1,164382 & -0,391747 & -0,8129687 \\ 1,164382 & 2,0172304 & 0 \end{pmatrix} \times \left(\begin{pmatrix} Y \\ C_B \\ C_R \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 16 \\ 128 \\ 128 \end{pmatrix} \right). \quad (7)$$

в) *Преобразование формата цветности 4:4:4 в формат 4:2:2 или 4:2:0 и восстановление первичной частоты дискретизации цветоразностных сигналов*

Уменьшение частоты дискретизации цветоразностных сигналов - достаточно простая задача, решаемая простым исключением соответствующих отсчетов. Главной целью было восстановление дискретизации (интерполяция). В данной модели использованы два метода повышения частоты дискретизации.

Первый метод довольно простой и реализуется простым повторением значений существующих отсчетов (рис. 2).

$$\begin{bmatrix} 1 & 3 & 2 \\ 4 & 5 & 6 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} 1 & 0 & 3 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 4 & 0 & 5 & 0 & 6 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} 1 & 1 & 3 & 3 & 2 & 2 \\ 1 & 1 & 3 & 3 & 2 & 2 \\ 4 & 4 & 5 & 5 & 6 & 6 \\ 4 & 4 & 5 & 5 & 6 & 6 \end{bmatrix}$$

Рис. 2

Второй метод основан на использовании импульсной характеристики цифрового фильтра [5], при прохождении которого длительность воздействия единичного импульса занимает некоторый промежуток времени, а не обусловлена только моментом появления импульса (рис. 3). Используя это свойство и учитывая

значения нескольких соседних пикселей, рассчитываются отсутствующие пиксели. Нужно отметить, что второй метод обеспечивает более правильное восстановление отсутствующих отсчетов (рис. 4).

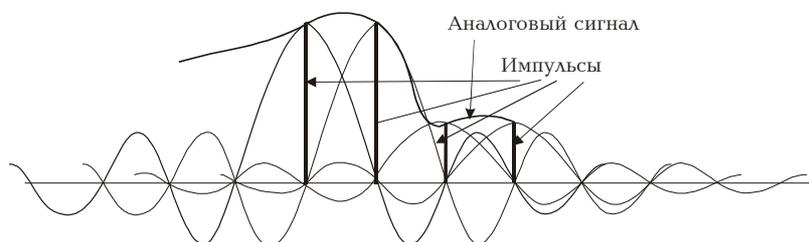


Рис. 3

Межкадровое сжатие

а) Расчет вектора движения для каждого макроблока

В модели реализован трехшаговый метод поиска вектора движения, который довольно распространен в кодерах. При этом методе первоначально поиск производится для вектора с шагом в 4 пиксела, затем в 2 пиксела и в конце в 1 пиксел. Расчет векторов движения производится отдельно для сигналов яркости и цветности, что обеспечивает правильную передачу цветов, если корреляция между кадрами по сигналам яркости и цветности различна;



а)



б)

Рис. 4. Ошибки при преобразовании формата 4:2:2 в формат 4:4:4:
а - с помощью первого метода, НСКО=5%; б - с помощью второго метода, НСКО=2%

б) *Расчет разностных кадров*

Расчет разностных кадров производится по следующему выражению:

$$\Delta F(x, y) = |F(x_0 + x, y_0 + y, t_0 + t) - F(x_0, y_0, t_0)|, \quad (8)$$

где $\Delta F(x, y)$ - значение пиксела в разностном кадре; $F(x_0 + x, y_0 + y, t_0 + t)$ - значение пиксела в рассчитанном кадре; $F(x_0, y_0, t_0)$ - значение пиксела в опорном кадре.

Внутрикадровое сжатие

а) *Дискретно-косинусное преобразование*

При обработке изображений используется двумерное дискретно-косинусное преобразование [3]:

$$F(u, v) = \frac{1}{N} \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} Y(x, y) C(x, u) C(y, v), \quad (9)$$

где $C(x, u) = A(u) * \cos\left(\frac{(2x+1)u\pi}{2n}\right), \quad A(u) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2}}, u = 0 \\ 1, u \neq 0 \end{cases},$

$$C(y, v) = A(v) * \cos\left(\frac{(2y+1)v\pi}{2n}\right), \quad A(v) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2}}, v = 0 \\ 1, v \neq 0 \end{cases}.$$

б) *Квантование и восстановление ДКП коэффициентов*

Квантование ДКП коэффициентов происходит по следующему выражению [3]:

$$A' = \text{int}\left(\frac{8A}{mQ}\right), \quad (10)$$

где Q - коэффициент сжатия, а m - вес каждого коэффициента, который определяется его местоположением в матрице согласно стандарту MPEG-2.

В данном случае использовано несколько таблиц квантования [2,4]. Соответственно восстановление коэффициентов ДКП происходит, исходя из выражения (10):

$$A = \text{int}\left(\frac{A' m Q}{8}\right). \quad (11)$$

На основе вышеприведенных выражений, а также ввиду реализации алгоритма Хаффмана разработан пакет программ на языке Delphi (рис. 5), позволяющий шаг за шагом пройти весь процесс сжатия изображения, наглядно увидеть влияние того или иного параметра (коэффициент сжатия, значение обнуления, коэффициент передачи НЧ фильтра, формат дискретизации и т. д.) на качество сжатия. При помощи разработанной модели были получены зависимости нормированной среднеквадратичной ошибки (НСКО) и отношения сигнал/шум от ряда параметров.

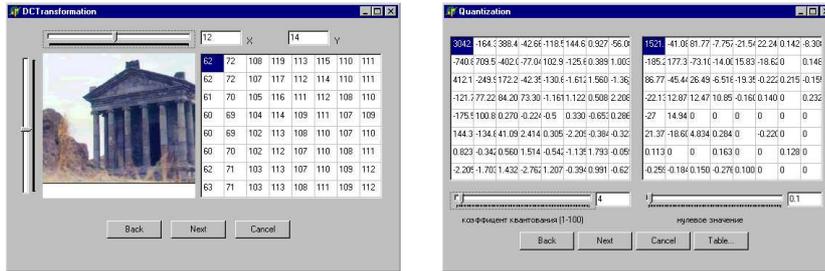


Рис. 5

**СПИСО
К
ЛИТЕРА
ТУРЫ**

1. **Гласман К. Циф**

1. ...роевое наземное вещание // Журнал "625". – 1999. – N 4.- С. 66 – 70.
2. Цифровая обработка телевизионных и компьютерных изображений / Под ред. **Ю.Б. Зубарева и В.П. Дворковича.** –М.: DVP, 1997 – 255 с.
3. **Gonzalez, C. Rafael , Paul Wintz.** Digital image processing. 1977 Reading Mass.
4. **ISO /IEC JTC1/SC29/WG11 N3536. Overview of the MPEG 4 standart Beijing July 2000.**
5. Childer Donald, Durling Allen. Digital filtering and signal processing. USA: 1975.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 25.12.2002.

**Մ.Կ. ՔՈՉԱՐՅԱՆ
ՍԵՂՄՄԱՆ ԳՈՐԾՆԹԱՑՆԵՐԻ ՍՈՂԵԼԱՎՈՐՈՒՄԸ
ՀԱՄԱՁԱՅՆ MPEG-2 ՍՏԱՆԴԱՐՏԻ**

Աշխատանքում ներկայացված է MPEG-2 տեսաինֆորմացիայի սեղմման ստանդարտում կիրառվող սեղմման ալգորիթմերի մոդելների մշակումը: Տրված է տեսաազդանշանի նախնական մշակման, միջկադրային և ներկադրային սեղմումների փուլերի մոդելների նկարագրությունը :

**S. K. KOCHARYAN
COMPRESSION PROCESS MODELLING MADE TO STANDART MPEG-2**

A compression process model made to standard MPEG-2 is presented. A signal pretreatment, intraframe compression and iterframe compression model descriptions are given.

А.С. ШАХКАМЯН

НЕЛИНЕЙНЫЙ ЦИФРО-АНАЛОГОВЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ

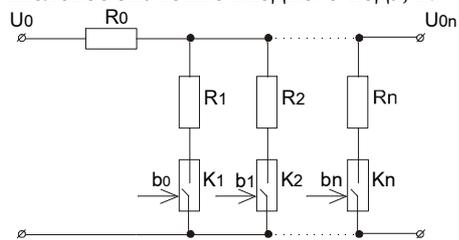
Предложена схема нелинейного ЦАП, приведены формулы для расчета основных параметров схемы.

Ключевые слова: нелинейный, цифро-аналоговый преобразователь, аппроксимация.

При построении цифро-аналоговых измерительных и управляющих систем для АСУТП часто возникает задача нелинейного цифро-аналогового преобразования. Эту задачу можно сравнительно просто решить на базе линейных цифро-аналоговых преобразователей (ЦАП) путем автоматического изменения крутизны преобразования. В настоящее время промышленностью серийно выпускаются интегральные ЦАП, которые обладают высокими метрологическими характеристиками [1], имеют внешний источник опорного напряжения (ИОН) и внешний операционный усилитель (ОУ). При этом ЦАП представляет собой усилитель постоянного тока (УПТ), коэффициент усиления которого изменяется путем кодового управления сопротивлениями обратной связи, а его выходное напряжение равно

$$U_{\text{вых}} = \frac{U_{\text{он}}}{N_m} N_x, \quad (1)$$

где $U_{\text{он}}$ - напряжение ИОН; N_m - максимальное числовое значение входного кода; N_x -



числовое значение преобразуемого кода.

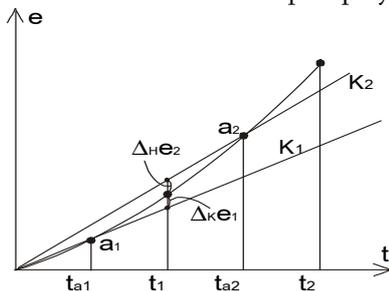


Рис.1

Рис.2

Следовательно, для изменения крутизны преобразования наиболее целесообразно изменять напряжение ИОН. Для этого необходимо построить ИОН по

схеме кодоуправляемого делителя напряжения (КДН) и его управление осуществлять от информационных кодовых сигналов b_j (рис.1).

Для расчета параметров КДН требуемая нелинейная функция преобразования аппроксимируется кусочно-линейной функцией (рис.2). При этом аргументы узловых точек аппроксимации целесообразно брать кратными 2^n . Следовательно, длина каждого участка кусочно-линейной аппроксимации (КЛА) будет равна 2^n единицам младшего разряда (ЕМР) входного кода. Принимая $n=5$, для длины участка КЛА получим $\Delta X=32$ ЕМР, при этом первые пять разрядов входного кода не будут использованы для управления КДН (нужно использовать разряды с весовыми коэффициентами 2^5 и выше).

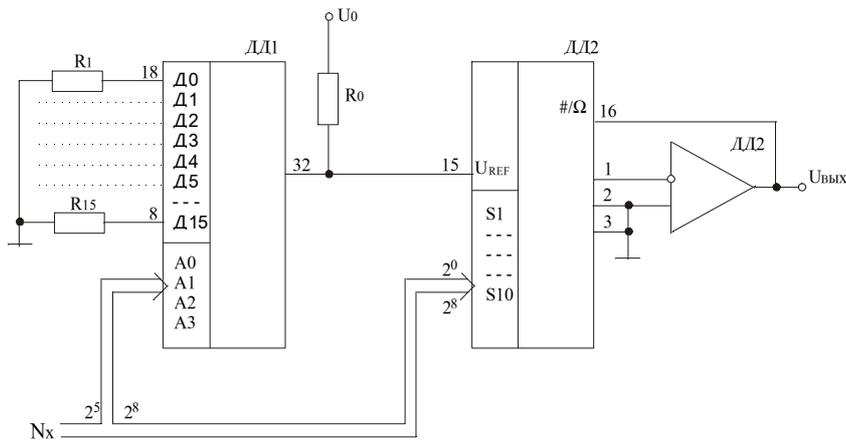


Рис.3

Для переключения резисторов КДН целесообразно использовать аналоговые ключи на КМОП структурах (например, серии К591). Если длину участка КЛА взять равной $\Delta X=32$ ЕМР, то при применении микросхемы К591КН1 на его управляющие кодовые входы с весами $2^0, 2^1, 2^2, 2^3$ необходимо подать информационные кодовые сигналы с весами $2^5, 2^6, 2^7, 2^8$ соответственно. Тогда с помощью одной микросхемы можно управлять параметрами КДН с 16 управляемыми плечами. В этом случае максимальное значение входной величины должно соответствовать девятиразрядному двоичному коду, что будет равно $N_{\max}=(2^9-1)$ ЕМР. Схема преобразователя приведена на рис. 3.

В табл.1 приведены логические состояния управляющих входов мультиплексора для всех участков КЛА при $\Delta X=32$ ЕМР.

Таблица 1

2^8	2^7	2^6	2^5	X, ЕМР	2^8	2^7	2^6	2^5	X, ЕМР
0	0	0	0	$0 \leq X < 32$	1	0	0	0	$256 \leq X < 288$
0	0	0	1	$32 \leq X < 64$	1	0	0	1	$288 \leq X < 320$
0	0	1	0	$64 \leq X < 96$	1	0	1	0	$320 \leq X < 352$
0	0	1	1	$96 \leq X < 128$	1	0	1	1	$352 \leq X < 384$
0	1	0	0	$128 \leq X < 160$	1	1	0	0	$384 \leq X < 416$
0	1	0	1	$160 \leq X < 192$	1	1	0	1	$416 \leq X < 448$
0	1	1	0	$192 \leq X < 224$	1	1	1	0	$448 \leq X < 480$
0	1	1	1	$224 \leq X < 256$	1	1	1	1	$480 \leq X < 512$

На каждом j -ом участке КЛА открывается соответствующий ключ, и выходное напряжение КДН будет равно

$$U_{onj} = \frac{R_j}{R_j + R_0} U_0, \quad (2)$$

где R_j - суммарное (с учетом сопротивления открытого ключа) сопротивление j -го плеча КДН; U_0 - входное напряжение КДН.

Определение сопротивлений R_j производится при известных U_{onj} , U_0 и номинальном токе нагрузки источника напряжения U_0 , а сопротивление R_0 следует брать по возможности меньше.

Для принятого способа КЛА аппроксимирующие прямые должны исходить из одной начальной точки. При линеаризации монотонной нелинейной статической характеристики (НСХ) аппроксимирующие прямые целесообразно провести через средние точки каждого поддиапазона КЛА, если НСХ имеет небольшую нелинейность, что имеет место в большинстве датчиков неэлектрических величин (термоэлектрические преобразователи, термопреобразователи сопротивления и др.). Тогда напряжения U_{onj} будут соответствовать средним точкам участка аппроксимации (a_1, a_2 и т.д.), а крутизна КЛА на j -ом участке аппроксимации определится выражением

$$K_j = \frac{U_{onj}}{t_{aj}}, \quad (3)$$

где t_{aj} - значение аргумента функции преобразования, соответствующее середине участка аппроксимации.

При этом погрешность линеаризации получится наибольшей в начальной (Δ_n) и конечной (Δ_k) точках каждого поддиапазона и определится выражениями

$$\Delta_k e_j = K_j t_j - e_j^0, \quad (4)$$

$$\Delta_n e_j = K_j t_{j-1} - e_{j-1}^0, \quad (5)$$

где K_j - крутизна КЛА на j -ом участке; e_j^0 , e_{j-1}^0 - значение аппроксимируемой функции в j -й и $(j-1)$ -й узловых точках; t_j , t_{j-1} - аргументы соответствующих узловых точек.

Следует отметить, что максимальное значение погрешности КЛА может получиться в каждой узловой точке при переходе на следующую (с большей крутизной) аппроксимирующую линию, тогда

$$\Delta_{max} e_j = K_{j+1} t_j - e_j^0. \quad (6)$$

Выходное напряжение ЦАП определяется выражением [1]:

$$U_{вых} = U_{0n} R_{0c} \frac{1}{R \cdot 2^n} [S_1 2^{n-1} + S_2 \cdot 2^{n-2} + \dots + S_n 2^0]. \quad (7)$$

Для ЦАП типа К572ПА2 имеем $R_{0c} = R$, тогда

$$U_{вых} = \frac{U_{0n}}{2^n} [S_1 2^{n-1} + S_2 \cdot 2^{n-2} + \dots + S_n 2^0]. \quad (8)$$

Для ЦАП К572ПА2 $n = 12$, поэтому значения U_{onj} можно определить по формуле

$$U_{onj} = \frac{U_{ввх}(a_j)}{N_{a_j}} 2^{12} = \frac{4096}{N_{a_j}} U_{ввх}(a_j), \quad (9)$$

где $U_{ввх}(a_j)$ - выходное напряжение линеаризованного ЦАП в точке a_j ; N_{a_j} - числовое значение (в ЕМР) входного кода, соответствующее точке a_j .

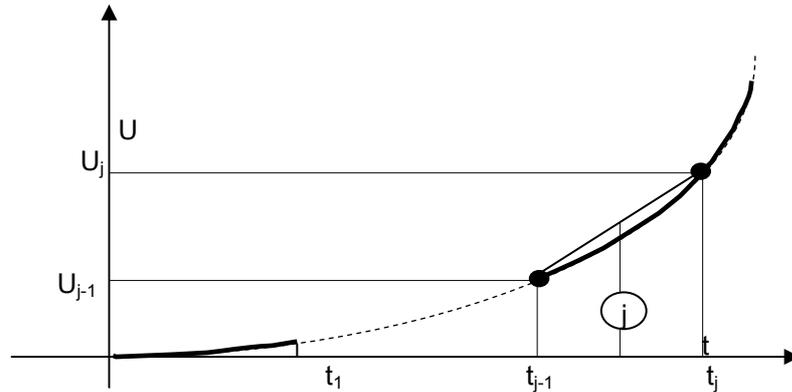


Рис.4

В качестве примера рассмотрим расчет параметров КДН для получения нелинейной статической характеристики, соответствующей статической характеристике термоэлектрического преобразователя типа ТХК. Принимая, что ЕМР входного кода соответствует 1°C , для рассмотренного выше случая получим $N_{\text{макс}}=511^\circ\text{C}$, $\Delta X=32^\circ\text{C}$. В табл.2 приведены значения $\Delta_{\text{нЕ}j}$ и $\Delta_{\text{кЕ}j}$, соответствующие КЛА, аппроксимирующие линии которой проходят через средние точки каждого участка КЛА.

Таблица 2

X, °C		X _{ср} , °C	Погрешность, °C		Δ _{макс} , °C	K _j , мВ/°C	Δ _{М2} , °C
от	до		Δ _{нЕj}	Δ _{кЕj}			
0	32	16	-	-0.51	-0.51	0.06494	0.16
32	64	48	0.42	-0.81	-0.81	0.06688	0.15
64	96	80	0.62	-0.71	-0.71	0.06836	0.13
96	128	112	0.80	-1.20	-1.20	0.06941	0.11
128	160	144	1.10	-1.42	-1.42	0.07061	0.10
160	192	176	1.53	-1.91	-1.91	0.07185	0.09
192	224	208	1.88	-1.50	-1.88	0.07316	0.08
224	256	240	1.94	-1.94	-1.94	0.07442	0.07
256	288	272	1.94	-1.94	1.94	0.07547	0.06
288	320	304	1.83	-1.83	1.83	0.07637	0.05
320	352	336	1.95	-1.50	1.95	0.07716	0.04
352	384	368	1.50	-1.42	1.50	0.07798	0.03
384	416	400	1.99	-1.99	1.99	0.07870	0.02
416	448	432	1.95	-1.95	1.95	0.07936	0.017
448	480	464	1.93	-1.93	1.93	0.07996	0.005
480	512	496	1.80	-1.80	1.80	0.08048	-0.005

При большой нелинейности рассмотренный способ КЛА (рис.2) не может обеспечить требуемую точность, поэтому КЛА нужно производить ломаной линией (рис.4). Тогда преобразование нужно осуществлять по предлагаемой

усовершенствованной схеме (рис.5), которая отличается от схемы рис.3 тем, что отдельно вырабатывается напряжение, соответствующее начальной узловой точке данного участка аппроксимации U_{j-1} , и к нему суммируется напряжение, соответствующее младшим разрядам кода (для $\Delta X=32$ ЕМР это разряды b_0-b_4 с весовыми коэффициентами 2^0-2^4).

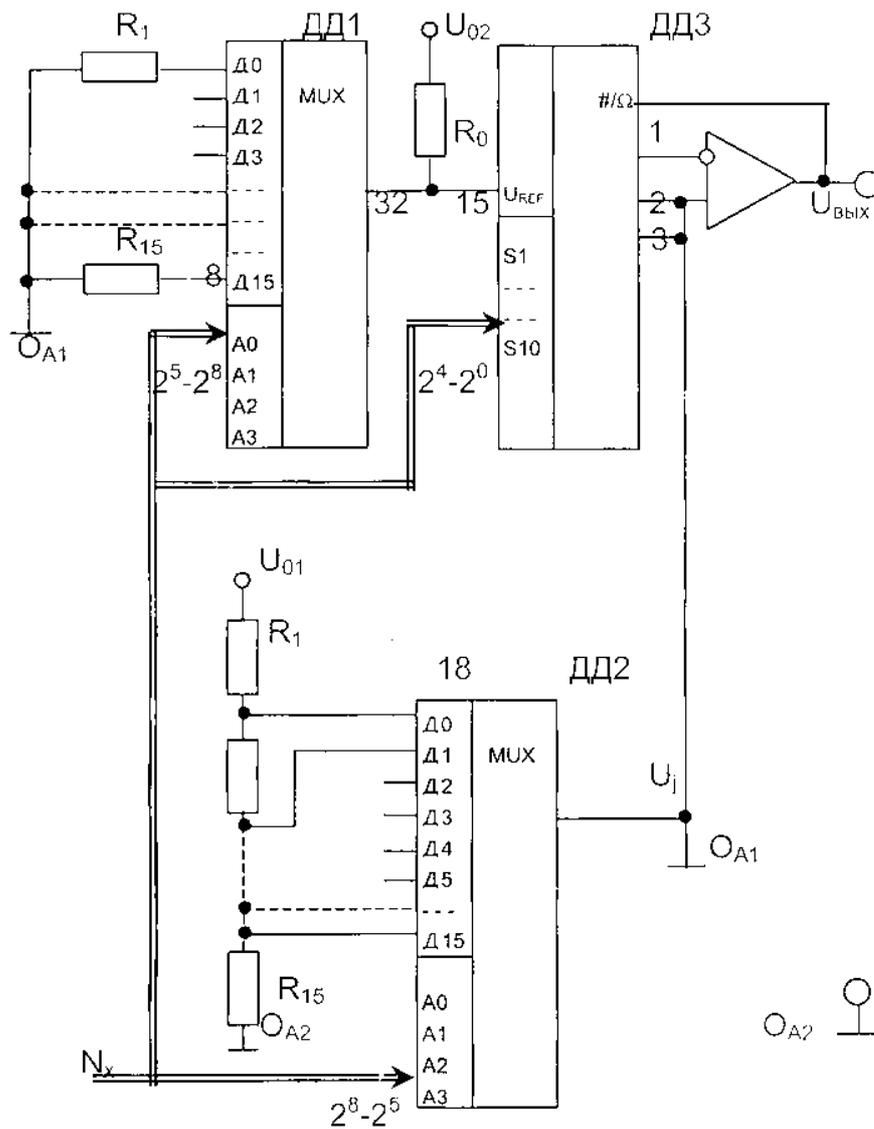


Рис.5

Напряжения, соответствующие узловым точкам, получаются делителем напряжения, который питается от стабилизированного источника напряжения U_{01} . Выходы делителя напряжения подключены к аналоговому мультиплексору ДД2, на выходе которого получаются напряжения, соответствующие узловым точкам. При этом мультиплексор ДД2 управляется старшими разрядами преобразуемого кода (при $X=2^5$ ЕМР это разряды с весовыми коэффициентами 2^5 и выше), одновременно поступающими на мультиплексор ДД1, с помощью которого задаются крутизны преобразования для каждого участка аппроксимации. На выходе мультиплексора ДД1 получаются опорные напряжения ЦАП для каждого участка аппроксимации. В этой схеме можно использовать ЦАП с малым количеством разрядов (при $\Delta X=2^5$ ЕМР можно использовать пятиразрядный ЦАП). Опорные напряжения получаются в КДН, как и в первой схеме, однако источник напряжения питания U_{02} должен быть гальванически развязан от источника напряжения U_{01} .

На выходе суммирующего ОУ ЦАП получится напряжение (по отношению к общей точке O_{A1} схемы):

$$U'_{\text{вых}i} = K_i \Delta N, \quad (10)$$

где K_j - крутизна j -го участка КЛА функции преобразования; $\Delta N = N_x - N_{j-1}$; N_x - число, соответствующее преобразуемому коду; N_{j-1} - число, соответствующее начальной узловой точке данного участка.

Выход мультиплексора ДД2 соединен с общей аналоговой точкой O_{A1} , следовательно, выходное напряжение преобразователя получится между общей аналоговой точкой O_{A2} и выходом ОУ и равно

$$U_{\text{вых}i} = U_{(j-1)} + K_i \Delta N.$$

В этом случае погрешность преобразования получается максимальной в средних точках участков КЛА. Значения погрешностей для рассмотренного примера при втором способе КЛА приведены в последнем столбце табл.2 $\Delta(m_2)$. Как видно из табл.2, погрешность преобразования во втором случае намного меньше, чем в первом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федорков Б.Г. и др. Микроэлектронные АЦП и ЦАП. - М.: Энергоатомиздат, 1990. ГИУА. Материал поступил в редакцию 17.10.2001.

Ա.Ս. ՇԱԴԳԱՄՅԱՆ ՈՉ ԳԾԱՅԻՆ ԹԻՎ-ԱՆԱԼՈԳԱՅԻՆ ԿԵՐՊԱՓՈՒԽԻՉ

Առաջարկված են ոչ գծային ստատիկ բնութագրով թիվ-անալոգային կերպափոխիչի սխեմաներ, բերված են սխեմայի հիմնական պարամետրերի հաշվարկի բանաձևեր:

A.S. SHAGHGAMYAN NON-LINEAR DIGITAL-ANALOG TRANSDUCER

The circuit of non-linear DAC is proposed. The formulas for calculations of basic circuit parameters are shown.

С.Х. ХУДАВЕРДЯН

ОСОБЕННОСТИ СПЕКТРАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ФОТОТОКА В СТРУКТУРАХ НА ОСНОВЕ CdTe

Исследованы фотоприемные структуры с высокоомной прослойкой на основе CdTe, обладающие сменой знака спектрального фототока. Приведены спектральные зависимости фототока от внешнего напряжения и мощности падающего на образец излучения. В коротковолновой области спектра имеются два максимума, а точка смены знака фототока зависит от напряжения смещения. Показано, что наряду с фоточувствительностью исследуемые структуры обладают также фотометрическими свойствами. Дано физическое объяснение этих особенностей.

Ключевые слова: фотоприемные структуры, энергетическая зонная диаграмма, спектральная характеристика, фотогенерация носителей.

В работах [1-3] было показано, что в фотоприемных структурах с высокоомной прослойкой, расположенной между противоположно направленными потенциальными барьерами, наблюдается смена знака спектрального фототока. Это явление можно наглядно объяснить с помощью энергетической зонной диаграммы исследуемых структур (рис.1). Фототок $I_{\phi 1}$ обусловлен фотогенерированными носителями, разделенными первым потенциальным барьером, а $I_{\phi 2}$ – вторым.

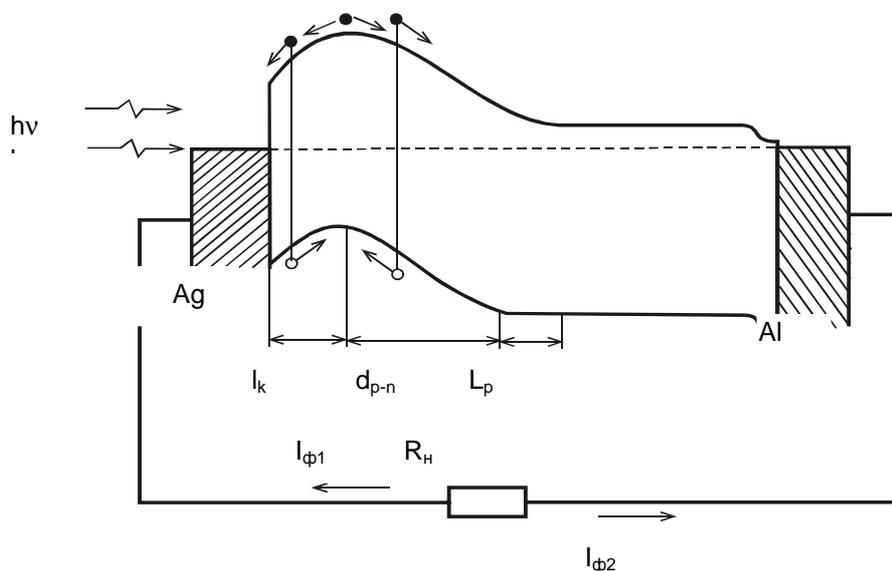


Рис. 1. Энергетическая зонная диаграмма диодных структур с высокоомной базой в продольном режиме освещения и фототоки встречных барьеров

Эти фототоки направлены в противоположные стороны. При продольном освещении в зависимости от длины волны поглощаемого излучения меняется соотношение между фототоками, и при определенной длине волны результирующий фототок меняет направление.

В настоящей работе исследованы особенности фотоэлектрических свойств подобных структур на основе CdTe. Как известно, CdTe обладает большой термо- и радиационной стойкостью и благодаря широкой запрещенной зоне способен обеспечить большие значения фото-ЭДС в фотоприемниках, изготовленных на его основе.

Эксперименты проводились на образцах, полученных путем термодиффузии Pt в низкоомный CdTe. В результате образовалась высокоомная прослойка CdTe : Pt. Со стороны прослойки омическим контактом служил полупрозрачный Ag, а с тыловой стороны - пленка Al [4]. К образцу прикладывалось постоянное напряжение, затем измерялся ток через сопротивление нагрузки $R_n = 10^9 \text{ Ом}$. Освещение образца через полупрозрачный контакт осуществлялось монохроматическим светом от осветителя ИО-24 через монохроматор УМ-2.

Спектральное распределение фототока короткого замыкания (к.з.) при разных интенсивностях освещения показано на рис. 2. В отличие от спектральных характеристик обычных фотодиодов в данном случае наблюдалась смена знака фототока.

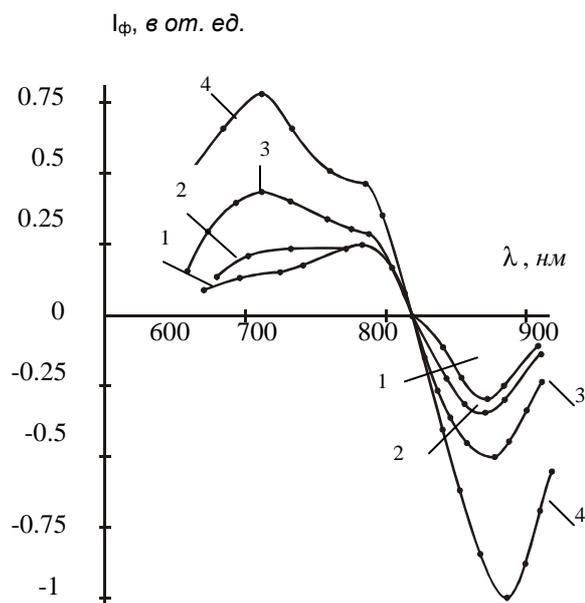


Рис. 2. Зависимость фототока к. з. от длины волны λ .
Мощность излучения увеличивается с увеличением нумерации кривых

Из рисунка видно, что в коротковолновой области наблюдаются два максимума при 710 и 780 нм, что соответствует энергиям квантов 1,74 и 1,59 эВ соответственно, причем при малых интенсивностях освещения доминирует максимум при $\lambda_1 \sim 780$

нм (рис.2, кр. 1 и 2). С увеличением интенсивности освещения максимальное значение фототока при $\lambda_2 \sim 710$ нм увеличивается и при мощностях освещения $W > 0,5$ мкВт становится больше, чем при $\lambda_1 \sim 780$ нм. Эти закономерности можно объяснить, если учесть, что глубина проникновения λ_1 равна $1/\alpha_1 \sim 400$ нм, а $\lambda_2 - 1/\alpha_2 \sim 250$ нм (α – коэффициент поглощения) [5], и предположить, что в приповерхностной области на глубине примерно до 250 нм расположены центры рекомбинации. Эти центры увеличивают скорость приповерхностной рекомбинации неосновных носителей тока, что приводит к уменьшению эффективного значения времени жизни. В результате уменьшается коротковолновый фототок. При увеличении глубины проникновения квантов электромагнитного излучения ($\lambda_1 \sim 780$ нм) вероятность захвата носителей приповерхностными рекомбинационными центрами уменьшается (эффективное время жизни увеличивается), так как более глубоко генерированные носители в ускоряющем поле приповерхностного барьера набирают достаточную энергию, чтобы, не подвергаясь воздействию центров рекомбинации, участвовать в длинноволновом фототоке.

При мощности освещения $W > 0,5$ мкВт число поглощенных квантов и фотогенерированных носителей значительно превосходит число приповерхностных центров рекомбинации, и эти центры перестают играть существенную роль в коротковолновом фототоке. Вследствие этого фототок при $\lambda_2 \sim 710$ нм начинает доминировать над фототоком при $\lambda_1 \sim 780$ нм (рис. 2, кр. 3 и 4).

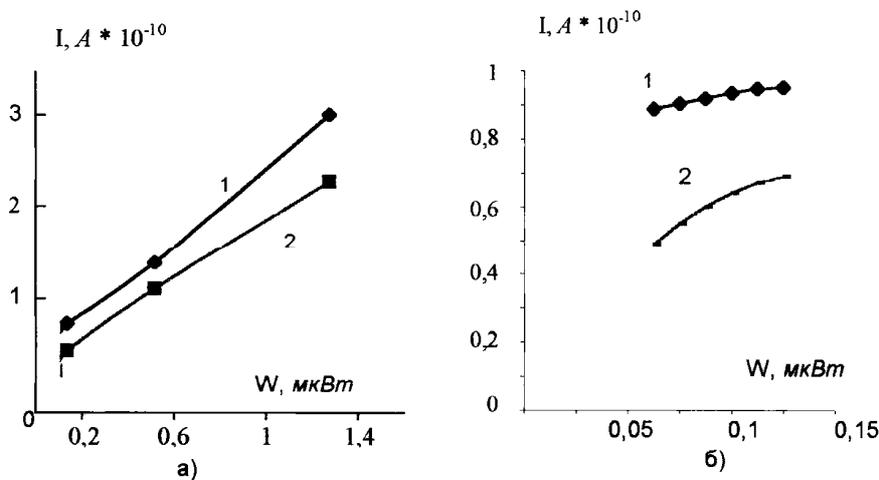


Рис 3. Зависимость фототока к.з. от мощности падающего на образец излучения: 1- $\lambda = 0,87$ мкм; 2 - $\lambda = 0,71$ мкм

На рис. 3 приведена зависимость максимальных значений фототока к.з. от мощности падающего излучения при двух различных длинах волн: $\lambda \sim 710$ нм (кр. 2 - положительный фототок) и $\lambda \sim 780$ нм (кр. 1 - отрицательный фототок). Зависимости на рис. 3 для удобства приведены в абсолютных значениях фототока к.з. На рис.3 б представлен начальный участок зависимости в развернутом виде. Как видно из рисунка, начальный участок при $\lambda \sim 710$ нм нелинейный (кр. 2). Длинноволновый

отрицательный фототок ($\lambda \sim 870 \text{ нм}$) создается вторым потенциальным барьером, для которого влияние приповерхностных рекомбинационных центров несущественно. Поэтому при малых мощностях излучения нелинейный участок отсутствует (рис. 3б, кр. 1). Дальнейший линейный рост фототока при $\lambda \sim 710$ и 870 нм , как и для обычных фотодиодов, переходит к насыщению.

По значениям насыщения фототока (фото-ЭДС) на рис.3 была оценена высота потенциальных барьеров, которая составила $0,27 \text{ эВ}$ для приповерхностного и $0,4 \text{ эВ}$ для глубоко расположенного барьеров. Эти значения несколько ниже, чем теоретические оценки, приведенные в [4]. Такое расхождение, по всей вероятности, связано с тем, что в экспериментах трудно было создать идеальный режим холостого хода. Кроме того, сказывается взаимовлияние встречных барьеров, которое полностью исключить невозможно. Однако следует отметить, что соотношения теоретически рассчитанных и экспериментально полученных высот потенциальных барьеров совпадали с точностью до $0,01$.

На рис. 4 представлена спектральная зависимость фототока при разных напряжениях смещения (“+” на Ад контакте). Наблюдаются две закономерности: во-первых, заметно увеличивается диапазон длин волн положительной фоточувствительности; во-вторых, точка смены знака фототока сдвигается в сторону длинных волн (при обратном смещении в сторону коротких волн).

Увеличение диапазона длин волн положительной фоточувствительности, как и у обычных фотодиодов, является результатом уменьшения скорости поверхностной рекомбинации под воздействием поля приповерхностного обратного смещенного барьера. В результате увеличивается эффективное время жизни неосновных носителей тока и соответственно коротковолновый фототок [6]. Вторая закономерность объясняется увеличением влияния обратного смещенного и уменьшением влияния прямо смещенного барьеров на общий фототок через структуру.

На рис. 5 показаны экспериментальная (кр. а) и теоретические (кр. б и в) зависимости точки инверсии спектрального фототока (λ_{inv}) от напряжения смещения. Насыщение экспериментальной кривой при больших напряжениях (“+” на Ag контакте) происходит по двум причинам:

- ввиду ограничения сдвига спектральной чувствительности в сторону длинных волн вследствие уменьшения собственной фотогенерации ($h\nu < E_g$);
- ввиду уменьшения высоты глубоко расположенного потенциального барьера, что приводит к уменьшению отрицательного фототока, и при достаточно больших напряжениях фототок становится положительным.

При увеличении обратного смещения (“- “ на Ag контакте) постепенно доминирует отрицательный фототок и при достаточно больших напряжениях становится полностью отрицательным.

Теоретическая кривая зависимости точки инверсии от напряжения смещения рассчитывалась по формуле

$$I_{\phi} = qSJ\beta[1 - 2\exp(-\alpha x_m) + \exp(-\alpha d)],$$

где q – заряд электрона; S – площадь светочувствительной поверхности;

J – интенсивность падающего излучения; β – квантовая эффективность; α – коэффициент поглощения; d – ширина высокоомной прослойки; x_m – ширина области объемного заряда приповерхностного перехода [1].

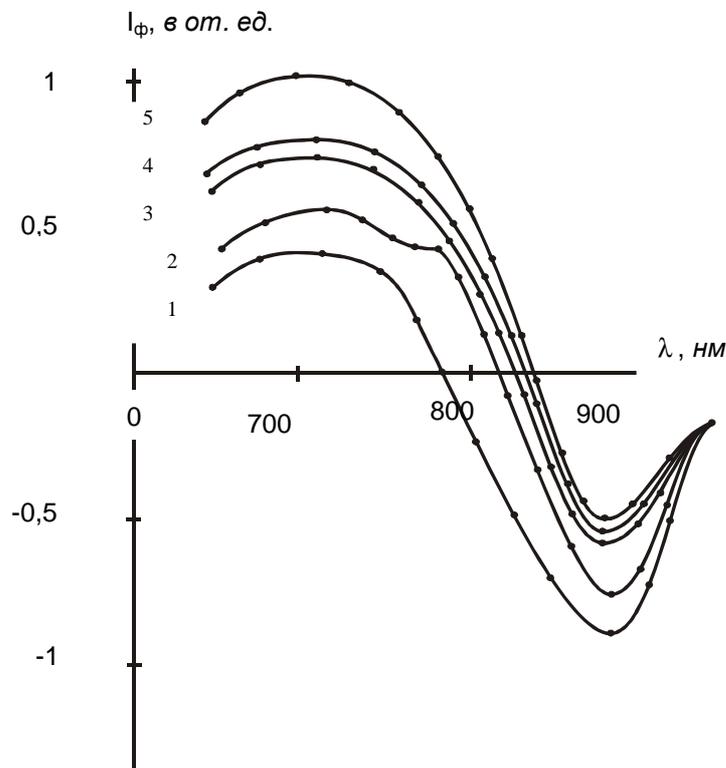


Рис.4. Спектральная зависимость фототока при разных напряжениях смещения: 1 – 0,04 В (“-” на Ag контакте); 2 – 0 В; 3 – 0,02 В; 4 – 0,04 В; 5 – 0,06 В (“+” на Ag контакте). Мощность падающего излучения постоянная

Как видно из рис. 5, теоретическая зависимость заметно отличается от экспериментальной по диапазону изменения λ_{inv} . Отличие в длинноволновой области объясняется наличием в широкозонных самокомпенсирующихся полупроводниках A^2B^6 достаточно больших концентраций мелких акцепторных и донорных примесей. Через эти примесные состояния происходит генерация электронно-дырочных пар при $h\nu < E_g$ путем термооптических переходов, что является причиной сдвига длинноволнового максимума в сторону длинных волн для экспериментальных образцов (рис. 2 и 4).

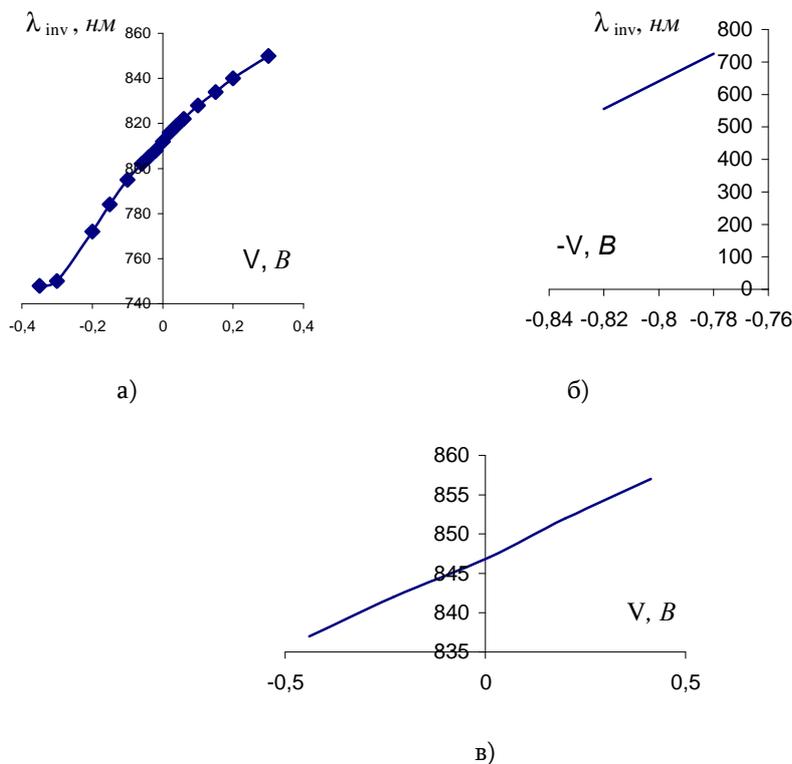


Рис. 5. Зависимость точки инверсии спектрального фототока (λ_{inv}) от напряжения смещения: а – экспериментальная, б - и в – теоретические

Различие в коротковолновой области объясняется наличием большого количества поверхностных центров рекомбинации в экспериментальных образцах, что приводит к уменьшению чувствительности в области коротких длин волн. Благодаря наличию линейного участка на кривой ($\lambda \sim$ от 750 до 820 нм) исследуемые структуры можно использовать в качестве фотометрического прибора (“0” - частотомера) с чувствительностью ~ 6 мВ/нм. При точности измерения 1 мВ разрешение предлагаемого прибора составляет примерно 0,17 нм (для сравнения укажем, что разрешение монохроматоров фирмы Edmund Industrie Optic GmbH составляет 0,2 нм).

Важно отметить, что точка инверсии фототока не зависит от мощности регистрируемого излучения (рис. 2).

На основе исследуемых структур можно создать фотометрический прибор – “0”- частотомер, так как их спектральную фоточувствительность можно управлять внешним напряжением. Наличие на спектральной характеристике двух устойчивых (положительного и отрицательного) максимумов может быть использовано для создания оптоэлектронных логических элементов. Таким образом, исследуемые структуры являются многофункциональными.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Khudaverdyan S.Kh., Grugoryan G. E., Pogosyan L. N.** Detectors of Electromagnetic Radiation Based on the Double-Barrier Structures //Applied Electromagnetism. – 1999. - V 2, №2 . – P.43-50
2. **Khudaverdyan S. Kh., Grigoryan G.E, Pogosyan L. N.** The Creation and Investigation of Photoelectric Features of the Double – Barrier Structures With Narrow Recrystallized Base //Materials Conference on Optoelectronic and Microelectronic Materials And Devices DEEE The University of Western Australia. –1998. - P. 242-244.
3. **Khudaverdyan S.Kh., Poghosyan L.N.** Tendencies of Development Photodetectors with Regulated Spectral Photosensit, Conversion Potential of Armenia and ISTC Programs //International seminar. – Yerevan. – 2000. Proceedings. Part II. - P. 163-166.
4. **Худавердян С. Х.** Двухбарьерные фотоприемные структуры с высокоомной прослойкой на основе п-CdTe // Моделирование, Оптимизация, Управление. ГИУА. – Вып. 2. – 1999. - С. 82-88.
5. **Bell R.O.** Review of optical applications of CdTe.- Revue de Physique applique, 1977. - V.12, Fevrier. - P. 391-399.
6. Полупроводниковые фотоприемники / Под ред. **В.И.Стафеева.** - М: Радио и связь,1984. - 216 с.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 02.04.2002.

Ս. Խ. ԽՈՒՎԵՐԴՅԱՆ ՖՈՏՈՂՈՍԱՆՔԻ ՍՊԵԿՏՐԱԼ ԲԱՇԽՎԱԾՈՒԹՅԱՆ ԱՌԱՆՁՆԱՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԸ CdTe ԿԱՌՈՒՑՎԱԾՔՆԵՐՈՒՄ

Հետազոտվել են սպեկտրալ ֆոտոհոսանքի նշանափոխումով օժտված բարձր օհմային շերտով ֆոտոընդունիչային կառուցվածքներ՝ CdTe – ի հիման վրա: Ներկայացված են ֆոտոհոսանքի սպեկտրալ կախվածությունները արտաքին լարումից ու կլանվող լույսի հզորությունից: Սպեկտրի կարճալիքային հատվածում առկա են երկու մաքսիմումներ, իսկ ֆոտոհոսանքի նշանափոխման կետը խիստ կախված է արտաքին լարումից: Ցույց է տրված, որ հետազոտվող կառուցվածքները, ֆոտոզգայնությանը զուգընթաց, ունեն ֆոտոմետրիկ հատկություններ: Տրված է այդ առանձնահատկությունների ֆիզիկական բացատրությունը:

S. Kh. KHUDAVERDYAN SPECTRAL PHOTOCURRENT DISTRIBUTION FEATURES IN STRUCTURES BASED ON CdTe

Photodetector structures with a high-resistance layer based on CdTe which possess spectral photocurrent sign change are investigated. Spectral dependences of photocurrent on external voltage and incidenting radiation power on the sample were presented. There are two maxima in the short wave of the spectrum and the point of photocurrent sign change strongly depends on voltage of displacement. It is shown that alongside with photosensitivity the structures to be researched also have photometric properties. The physical explanation to these features is given.

Հ.Հ. ՀԱՐՈՒԹՅՈՒՆՅԱՆ

ՄԻԼԻՑԻԴ-ՄԻԼԻՑԻՈՒՄ-ՄԻԼԻՑԻԴ ԿԱՌՈՒՑՎԱԾՔՆԵՐԻ ՖՈՏՈԷԼԵԿՏՐՈՆԻԿԱՆ ՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՈՒՍՈՒՄՆԱՍԻՐՈՒՄ

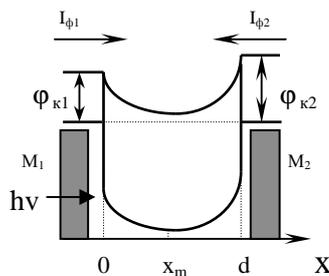
Դիտարկվում է նեղ բազայով բազմաֆունկցիոնալ երկարգելքային ֆոտոընդունիչային կառուցվածքների սպեկտրալ բնութագրի երկարալիքային՝ $\lambda = 1,2-1,8$ մկմ տեղամասը, որտեղ կառուցվածքի արդյունաբար հոսանքը պայմանավորված է թիկունքային սիլիցիդային շերտից առաջացած ֆոտոէմիսիայով: Ցույց է տրված կառուցվածքը որպես «գրո հաճախականաչափ» օգտագործելու համար ընկնող ճառագայթի ալիքի երկարության որոշման ճշտության մեծացումը:

Առանցքային բառեր: սպեկտրալ բնութագիր, ֆոտոգեներացված լիցքակիրներ, ծավալային լիցքերով շերտ, թիկունքային արգելք, $\square 0$ -հաճախականաչափ:

Բարակ բազայով երկարգելք ֆոտոընդունիչային կառուցվածքների սպեկտրալ բնութագրերը՝ կլանման սեփական և կարճալիքային տիրույթում ֆոտոէմիսիայի առկայության և բացակայության պայմաններում, դիտարկված են [1,2]-ում, իսկ կառուցվածքը որպես «գրո հաճախականաչափ» օգտագործելու համար սպեկտրալ ֆոտոհոսանքի նշանափոխման կետի դիրքի կախվածությունը արտաքին լարումից՝ [1]-ում:

Կառուցվածքի՝ որպես ֆոտոընդունիչ և «գրո հաճախականաչափ» օգտագործման հնարավորությունն ընդլայնում է վերջինիս ֆունկցիոնալ հնարավորությունները:

Նկար 1-ում պատկերված է դիտարկվող սիլիցիդ-սիլիցիում-սիլիցիդ կառուցվածքների էներգետիկ դիագրամը:



Նկ. 1. Սիլիցիդ-սիլիցիում-սիլիցիդ կառուցվածքի գոտային դիագրամ

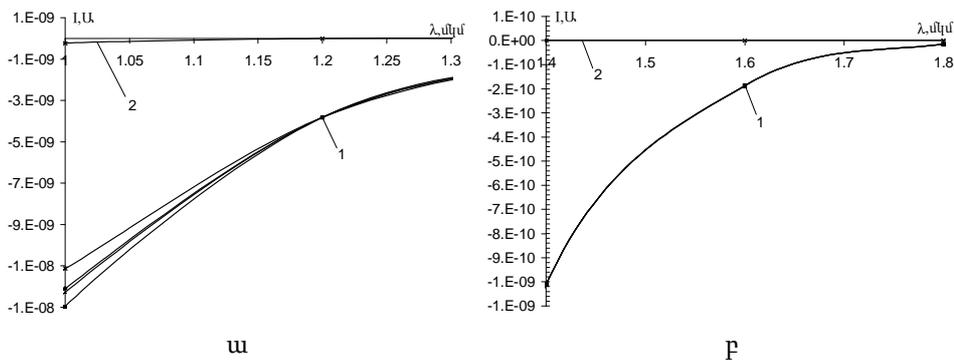
Երկու արգելքներով պայմանավորված ֆոտոհոսանքներն առաջին արգելքի կողմից էլեկտրամագնիսական ալիքի երկայնական կլանման պայմաններում միմյանց հակառակ են ուղղված և պայմանավորում են ընդհանուր ֆոտոհոսանքի նշանափոխման երևույթը [1,2]:

Կառուցվածքի արդյունաբար ֆոտոհոսանքը [1] որոշվում է հետևյալ արտահայտությամբ.

$$I_{\phi} = qSI_0 \frac{1 - R_1'}{1 - R_1 R_2 e^{-2\alpha d}} \left[\beta \left((1 + e^{-\alpha d})(1 - R_2 e^{-\alpha d}) - 2e^{-\alpha X_m}(1 - R_2 e^{-2\alpha(d-X_m)}) \right) - YP(E)(1 - R_2)e^{-\alpha d} \right]$$

որտեղ q -ն էլեկտրոնի լիցքն է, S -ը՝ լուսազգայուն մակերեսը, I_0 -ն՝ ընկնող ճառագայթի ինտենսիվությունը, β -ն՝ քվանտային ելքը, R_1' -ը՝ մակերևույթից անդրադարձման գործակիցը, R_1 -ը՝ 1 սիլիցիդային շերտից դեպի սիլիցիում արդրադարձման գործակիցը, R_2 -ը՝ թիկունքային սիլիցիդային շերտից անդրադարձման գործակիցը, X_m -ը և d -ն, համապատասխանաբար, առաջին և երկրորդ արգելքների ծավալային լիցքերով տիրույթների լայնություններն են, α -ն կլանման գործակիցն է սիլիցիումի ծավալում, $P(E)$ -ն՝ թիկունքային սիլիցիդային շերտից ֆոտոէմիսիայի հավանականությունը, Y -ը՝ սիլիցիդային շերտի քվանտային ելքը:

Նկար 2-ում պատկերված է վերոնշյալ արտահայտությամբ հաշվարկված սիլիցիդ-սիլիցիում-սիլիցիդ կառուցվածքների սպեկտրալ բնութագրի երկարալիքային տիրույթը ֆոտոէմիսիայի առկայության (կոր 1) և բացակայության (կոր 2, այսինքն, երբ թիկունքային կոնտակտի անդրադարձման գործակիցը հավասար է մեկի) պայմաններում: Ինչպես երևում է նկար 2-ից (կոր 2), կառուցվածքի ֆոտոհոսանքը կլանվող ճառագայթի ալիքի երկարության $\lambda \geq 1,12 \mu\text{m}$ -ի դեպքում (այսինքն, երբ քվանտի էներգիան փոքր է արգելման գոտու լայնությունից) հավասար է զրոյի: Իսկ ֆոտոէմիսիայի առկայության պայմաններում (կոր 1) ֆոտոհոսանքը զրոյից տարբեր է, նվազում է էքսպոնենցիալ օրենքով և $\lambda = 1,8 \mu\text{m}$ -ի դեպքում համաչափելի է դառնում մթնային հոսանքի հետ: Այսինքն, թիկունքային կոնտակտից ֆոտոէմիսիան մեծացնում է կառուցվածքի ֆոտոզգայունության սպեկտրալ միջակայքը:

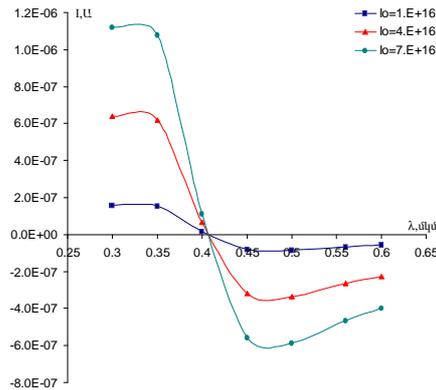


Նկ. 2. Ֆոտոընդունիչի սպեկտրալ բնութագրի երկարալիքային տիրույթ
 ա) $\lambda=1-1,3 \mu\text{m}$, բ) $\lambda=1,4-1,8 \mu\text{m}$ միջակայքում

Կառուցվածքի՝ որպես “զրո հաճախականաչափ” օգտագործելու համար կարևոր խնդիր է ընկնող ճառագայթի ալիքի երկարության որոշման ճշտության մեծացումը:

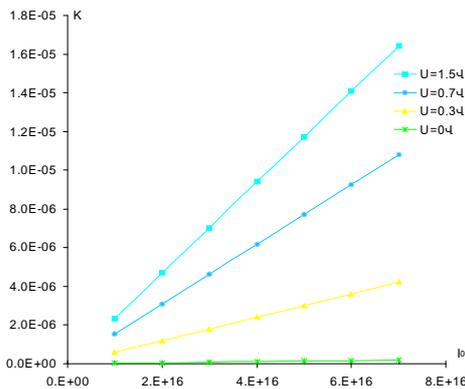
Նկար 3-ում պատկերված է կառուցվածքի սպեկտրալ բնութագիրն ընկնող ճառագայթի տարբեր ինտենսիվությունների և կիրառված արտաքին լարման $U=1,5$ Վ հաստատուն արժեքի դեպքում:

Բնութագրից ակնհայտ երևում է, որ ինտենսիվության մեծացումը հանգեցնում է ֆոտոհոսանքի ավելի կտրուկ նշանափոխման, այսինքն, ինվերսման կետի ավիքի երկարության որոշման ճշտության մեծացման, ինչը նպաստավոր է կառուցվածքը որպես «զրո հաճախականաչափ» օգտագործելու համար:



Նկ. 3. Կառուցվածքի սպեկտրալ բնութագիրն ընկնող ճառագայթի տարբեր ինտենսիվությունների դեպքում

Նկար 4-ում ցույց է տրված մեր կողմից նշանակված K գործակցի կախվածությունն ընկնող ճառագայթի ինտենսիվությունից, կառուցվածքին կիրառված տարբեր շեղման լարման արժեքների դեպքում, որտեղ $K=\Delta I / \Delta \lambda$ – ն ինվերսման կետի ճշտության գործակիցն է:



Նկ. 4. Ինվերսման կետի ճշտության գործակցի կախումն ընկնող ճառագայթի ինտենսիվությունից, կառուցվածքին կիրառված տարբեր շեղման լարումների դեպքում

Ինչպես երևում է նկար 4-ից, չափման ճշտությունը մեծանում է շեղման լարման մեծացման դեպքում (մեծանում է կորերի թեքության անկյունը): Արտաքին

լարման $U=1,5$ Վ-ի և $I_0=10^{16}$ ըմ/սմ² Վ դեպքում ալիքի երկարությունը $\Delta\lambda=0,1$ մկմ-ով փոխելիս հոսանքը փոխվում է 10^{-7} Ա-ով, և բեռի դիմադրության 10^5 օհմ-ի դեպքում լարման անկման փոփոխությունը կազմում է 10 մՎ, ինչը հնարավոր է հեշտությամբ չափել: Եթե ընդունենք, որ չափելի է 1 մՎ, ապա ընկնող ալիքի երկարությունը կարելի է չափել նաև 10 նմ ճշտությամբ: Չափման այդպիսի ճշտություն ունեն, մասնավորապես, Edmond-optics ֆիրմայի մոնոքրոմատորները:

Հաշվի առնելով ներկայացված ֆոտոընդունիչի չափերը և պահանջվող սնող լարման շատ փոքր արժեքները, ակնհայտ են դառնում առաջարկվող կառուցվածքի առավելությունները:

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. **Khudaverdyan Kh., Harutyunyan H.** Study of Photo-Emission Current Impact on Spectral Characteristics of Double Barrier Photo-Receiving //2002 23-rd international conference on microelectronics, Yugoslavia, 12-15 May 2002. -V. 1. -P. 339-341.
2. **Худавердян С.Х.** О механизме влияния отражающих свойств контактов на фотоприемные свойства двухбарьерных структур // Моделирование, оптимизация, управление. МНО РА, ГИУА, 2002. -Вып. 5. - С. 127-134.

А.А. АРУТЮНЯН

ИЗУЧЕНИЕ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СИЛИЦИД-СИЛИЦИУМ-СИЛИЦИД СТРУКТУР

Рассматривается длинноволновая часть спектрального распределения фототоков двухбарьерных структур с высокоомной прослойкой, где фототок обусловлен фотоэмиссией из тылового барьера. Показана возможность использования подобных структур в качестве “0-частотомера”.

H.H. HARUTYUNYAN

PHOTOELECTRIC PROPERTIES OF SILICIDE-SILICON-SILICIDE STRUCTURES RESEARCH

A long-wave part of spectral distribution of double-barrier structure photocurrents with high-resistance layer is considered, in which the photocurrent is conditioned by photoemission from back contact. The possibility of such structure use as “0-cymometer” is shown.

Հ.Լ. ԲԱԼԱՅԱՆ**ԱԿՏԻՎ ՓՈՒԼԱՎՈՐՎԱԾ ԱՆՏԵՆԱՅԻՆ ՑԱՆՑԻ
ՀԱՂՈՐԴՈՂ - ԸՆԴՈՒՆՈՂ ՄՈԴՈՒԼԻ
ԿԱՌՈՒՑՎԱԾՔԱՅԻՆ ՄԽԵՄԱ**

Աշխատանքի նպատակն է՝ ստանալ ակտիվ փուլավորված անտենային ցանցի՝ պարզ կառուցվածք ունեցող և հեշտությամբ ղեկավարվող հաղորդող-ընդունող մոդուլ: Պահանջվող արդյունքին հասնելու համար սարքի կառուցվածքային սխեմայում օգտագործված է թվային փուլաշրջիչ:

Առանցքային բառեր. թվային փուլաշրջիչ, մոդուլ, ուժեղարար, ձևափոխիչ:

Ռադիոհամակարգեր նախագծողների առջև ծառայած բազմազան խնդիրները հանգեցրին յուրահատուկ բնութագրերով տարբեր անտենաների ստեղծման անհրաժեշտությանը. ռադիոտեխնիկական համակարգերի արագագործության, աղմկակայունության մեծացման և լուծիչ ընդունակության լավացման պահանջները հանգեցրին փուլավորված անտենային ցանցերի (ՓԱՑ) հայտնագործմանը, իսկ վերջիններիս կայունության, ճառագայթվող հզորության մեծացման և տվյալ աղմկային իրավիճակին հարմարեցվելու պահանջները՝ ակտիվ փուլավորված անտենային ցանցերի (ԱՓԱՑ) ստեղծմանը:

ԱՓԱՑ-ի բնորոշ յուրահատկությունն այն է, որ նրա յուրաքանչյուր ճառագայթի կամ ճառագայթիչների խմբի տրակտում առկա են ակտիվ տարրեր՝ ուժեղարարներ, հաճախականության բազմապատկիչներ կամ ձևափոխիչներ [2] և այլն:

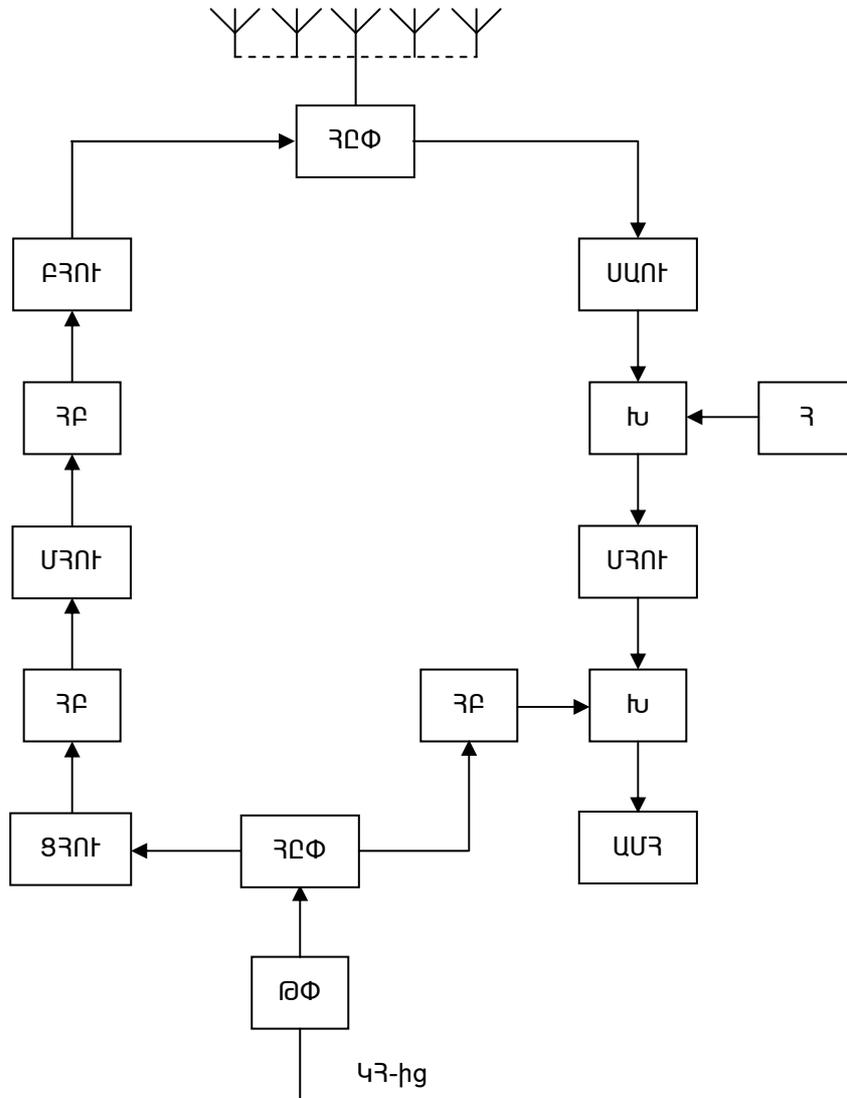
Ակտիվ տարրերն ուժեղացնում և ձևափոխում են իրենց մուտքերին տրված ազդանշանները: Դրանք պատրաստվում են կիսահաղորդչային կամ էլեկտրավակուումային սարքերի հիման վրա: Տարածության տրված սեկտորում անհրաժեշտ հաճախաշերտով էներգիա ճառագայթում կամ ընդունում են համաձայնեցնող շղթաներով ճառագայթիչները: Որպես ճառագայթող տարրեր օգտագործվում են ալիքատարներ, վիբրատորներ, դիէլեկտրիկական, ձողային, ճեղքային ճառագայթիչներ և այլն: Իսկ հաղորդվող կամ ընդունվող էներգիայի անհրաժեշտ փուլային շեղումն իրականացվում է էլեկտրոնային փուլաշրջիչների միջոցով, որոնք լինում են ալիքատարային, ֆերիտային, կիսահաղորդչային, թվային և այլն:

Ժամանակակից միկրոէլեկտրոնային տեխնոլոգիան հնարավորություն է տալիս վերոհիշյալ բոլոր բաղկացուցիչ տարրերն իրար հետ մտցնել ԱՓԱՑ-ի մեկ հաղորդող-ընդունող մոդուլի (ՀԸՄ) մեջ: Իսկ եթե հաշվի առնենք, որ հաղորդող-ընդունող մոդուլների քանակը մեկ ԱՓԱՑ-ում կարող է հասնել տասնյակ կամ հարյուրավոր հազարների՝ կախված անտենային ցանցի ճառագայթիչների թվից և ճառագայթվող հզորության մեծությունից, ապա նոր լուծումների որոնումը, որոնք թույլ կտան պարզեցնել մոդուլի կառուցվածքային սխեման, արդիական խնդիր է:

ԱՓԱՑ-ի ՀԸՄ-ի կառուցվածքային սխեմաներն աչքի են ընկնում մեծ բազմազանությամբ [1-3], ինչը պայմանավորված է սխեմայում փուլաշրջիչների

միացման ձևով, անհրաժեշտ հզորության բաշխման համակարգերի թվով, ակտիվ տարրերում հաճախականության ձևափոխման սարքերի առկայությամբ և այլն:

Առաջարկվող ՀԸՄ-ի կառուցվածքային սխեման ներկայացված է նկարում:



Նկ.

Սխեմայի աշխատանքի սկզբունքը հետևյալն է. հաղորդման ռեժիմում, համաձայն կառավարման համակարգից երկուսական կողի տեսքով ստացվող անհրաժեշտ փուլային շեղման ազդանշանի, ԹՓ թվային փուլաշրջիչի էլքում առաջանում է նույն փուլային շեղումով սինուսոիդալ տատանում: Թվային փուլաշրջիչի առանձնահատկությունն այն է, որ այն պարունակում է բազմաէլքային հապաղման գիծ և կվարցային գեներատոր [5], որոնցով հնարավոր է միաժամանակ գրգռել բազմաթիվ թվային փուլաշրջիչներ՝ դրանով իսկ

ապահովելով նրանց ելքային ազդանշանների կոհերենտությունը: Փուլաշրջիչի ելքին միացված ՀՀՓ ,հաղորդում-ընդունումե փոխանջատիչի միջով համապատասխան կերպով փուլավորված սինուսիդալ տատանումն անցնում է դեպի հաղորդող ուղի: Հաղորդող ուղում ցածր (ՅՀՈՒ), միջանկյալ (ՄՀՈՒ) և բարձր (ԲՀՈՒ) հաճախականության ուժեղարարների և ՀԲ հաճախականության բազմապատկիչների մեջ անհրաժեշտ հզորության ուժեղացումից և հաճախականության ձևափոխումից հետո ազդանշանը, արդեն գերբարձր հաճախականության «հաղորդում-ընդունում»փոխանջատիչի միջով, տրվում է ճառագայթչին:

Ընդունման ռեժիմում տվյալ ճառագայթչի ընդունած ազդանշանը ԳԲՀ «հաղորդում-ընդունում» փոխանջատիչի միջով անցնում է դեպի ընդունող ուղի: Ընդունող ուղում, անցնելով ՄԱՈՒ սակավ աղմկող ուժեղարարի, ՄՀՈՒ-ի և առաջին Խ խառնիչի միջով, որին միացված է Հ հետերոդինը, ազդանշանը տրվում է վերջին խառնիչին: Խառնիչի մյուս մուտքին տրվում է համապատասխան փուլային շեղումով թվային փուլաշրջիչի ելքային ազդանշանը, որը նախօրոք անցնում է ցածր հաճախականային ,հաղորդում-ընդունումե փոխանջատիչի և հաճախականության բազմապատկիչի միջով: Փաստորեն, ընդունման ռեժիմում փուլաշրջիչը կատարում է անհրաժեշտ փուլային շեղումով հետերոդինի դեր: Արդյունքում ԱՄՀ ազդանշանի մշակման համակարգին տրվում է ցածր հաճախականության ազդանշան, ինչի շնորհիվ պարզեցվում է նշված սարքի սխեման:

Առաջարկվող սխեմայի հիմնական առավելությունն այն է, որ, ի տարբերություն ՀՀՄ-ի գոյություն ունեցող տարբերակների, ներկայացված սխեմայի հաղորդող և ընդունող ուղիներում օգտագործվում է միևնույն թվային փուլաշրջիչը, ընդ որում՝ ցածր հաճախականության վրա: Սխեմայի փուլային սխալանքը հիմնականում պայմանավորված է փուլաշրջիչի փուլի փոփոխման սխալանքով և կազմում է $\approx 5-10^0$: Քանի որ նշված փուլաշրջիչը ղեկավարվում է երկուական կոդով, այն կարելի է կառավարել անմիջապես համակարգի կենտրոնական պրոցեսորից, այսինքն՝ չկա փուլաշրջիչի ղեկավարման հատուկ սարքի [4] միացման անհրաժեշտություն: Բացի դրանից, ներկայացված սխեմայում ընդունված ազդանշանների մշակումը կատարվում է ցածր հաճախականության վրա:

ՕԳՏԱԳՈՐԾՎԱԾ ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՈՒՆ

1. Антенны и устройства СВЧ: Проектирование фазированных антенных решеток / Под ред. **Д.И. Воскресенского**. - М.: Радио и связь, 1981. - 432 с.
2. **Гостюхин В.Л.** Вопросы проектирования активных ФАР с использованием ЭВМ. - М.: Радио и связь, 1983. - 248 с.
3. Проблемы антенной техники / Под ред. **Л.Д. Бахраха**. -М.: Радио и связь, 1989. - 368 с.
4. **Самойленко В.И.** Управление фазированными антенными решетками.- М.: Радио и связь, 1983.- 240 с.
5. Բալայան Հ.Լ. Թվային փուլաշրջիչ // ՀՊՃՀ-ի տարեկան գիտաժողովի նյութերի ժողովածու. - 2001. - էջ 449-451.

ՀՊՃՀ: Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 28.10.2001:

Г.Л. БАЛАЯН

**СТРУКТУРНАЯ СХЕМА ПРИЕМОПЕРЕДАЮЩЕГО МОДУЛЯ АКТИВНОЙ
ФАЗИРОВАННОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ**

Описан приемопередающий модуль активной фазированной антенной решетки, имеющий более простую структурную схему с простым управлением. Для получения необходимого результата в структурной схеме устройства использован цифровой фазовращатель.

H.L. BALAYAN

**TRANSMITTER - RECEIVER MODULE STRUCTURE SCHEME OF ACTIVE
PHASED ANTENNA ARRAY**

A transmitter - receiver module of phased antenna array having simpler structure and easy control is described. To obtain the necessary result in the structure scheme of the device, a digital phase chifter is used.

Д.К. ГУЛГАЗАРЯН

ФАЗОВЫЙ СВЕТОДАЛЬНОМЕР С СВЧ МОДУЛЯЦИЕЙ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Представлена новая схема фазового светодальномера повышенной точности. В полуволновом СВЧ резонаторе установлены два фотоумножителя так, что их полупрозрачные фотокатоды находятся в областях электрических полей резонатора. Резонатор возбуждается сигналами гетеродина с частотой 600 МГц. На опорный фотоумножитель направляется часть СВЧ модулированного лазерного излучения, а на сигнальный – отраженное от цели излучение. Измерением разности фаз промежуточной частоты сигнального и опорного фотоприемников определяют дальность. Погрешность измерения дальности меньше погрешности измерения серийного светодальномера ДК-001 и составляет $\approx 0,5$ мм.

Ключевые слова: лазер, СВЧ, разность фаз, резонатор, фотоумножитель.

Среди существующих методов определения дальности наиболее высокую точность обеспечивает фазовый способ, сущность которого заключается в измерении разности фаз φ между местным и отраженным от цели сигналами. Дальность определяется основным уравнением фазовой дальнометрии [1]

$$D = \frac{c}{2f_c} \left(N + \frac{\varphi}{2\pi} \right),$$

где N - целое число; c - скорость света; f_c - частота модуляции светового сигнала.

При $f_c = \text{const}$ погрешность измерения дальности ΔD определяется погрешностью измерения разности фаз $\Delta\varphi$:

$$\Delta D = \frac{c}{4\pi f_c} \Delta\varphi. \quad (1)$$

Отсюда следует, что чем выше частота модуляции светового потока (лазерного излучения), тем меньше погрешность измерения расстояния.

Так, например, если $f_c = 1000$ МГц, а $\Delta\varphi = 1^\circ$, то из (1) получим $\Delta D = 0,4$ мм. Это весьма высокая точность измерения для геодезических дальномеров.

Таким образом, для решения задачи высокоточной светодальнометрии необходимо иметь сверхвысокочастотные (СВЧ) модуляторы света и приемники такого излучения. Вопрос создания модуляторов света решен (хотя и с известными недостатками: большие напряжения, хрупкость и гигроскопичность светомодулирующих кристаллов и др).

Относительно СВЧ фотоприемников следует отметить, что как у нас, так и за рубежом такие приемники не выпускаются. Исключение составляют СВЧ полупроводниковые фотоприемники, однако их рабочая площадь незначительна (порядка $2 \cdot 10^{-4}$ см²), что делает их практически непригодным для ряда применений.

Открытие прибора, названного “фотоумножителем в резонаторе” [2], дало широкие возможности как для создания высокоточных светодальномеров, так и для

многоканальной оптической связи и светолокации. В этом приборе полупрозрачный фотокатод фотоумножителя помещен в области электрического поля резонатора. В результате обычный низкочастотный прибор превращается в СВЧ прибор, его верхний предел рабочей частоты повышается на несколько порядков.

Такое устройство было использовано в серийном светодальномере ДК 001, рабочая частота которого была около 750 МГц [3].

Учитывая некоторые принципиальные недостатки дальномера ДК001, обусловленные однорезонаторной конструкцией, нами предложена новая схема светодальномера [4].

Данное устройство содержит два фотоумножителя и один СВЧ полуволновой резонатор. Фотоумножители находятся в одинаковых условиях, т.е. электрические поля резонатора одинаково влияют на фотоэлектронные потоки фотоумножителей.

Схема фазового дальномера с СВЧ модуляцией лазерного излучения представлена на рисунке.

Устройство содержит источник лазерного излучения 1, модулированного СВЧ колебаниями, передающий объектив 2, приемный объектив 3, полупрозрачное зеркало 4, зеркало 5, опорный фотоумножитель 6, на торце которого со стороны полупрозрачного фотокатода 7 установлен внешний кольцевой электрод 8, сигнальный фотоумножитель 9, на торце которого со стороны полупрозрачного фотокатода 10 установлен внешний кольцевой электрод 11, полуволновой резонатор 12, содержащий внешний 13 и внутренний 14 стержни, СВЧ гетеродин 15, два усилителя промежуточной частоты 16, 17, фазометр 18. Между внешними электродами 8, 11 и концами внутреннего проводника 14 резонатора имеются емкостные зазоры 19, 20. Кроме того, на рисунке введены обозначения: F , F_1 , F_2 - световые потоки, модулированные с частотой f_c ; f_r - частота гетеродина.

Световой поток, модулированный с частотой f_c , из источника света 1 при помощи объектива 1 направляется к цели, дальность которой следует определить. Одновременно небольшая часть этого потока F_1 с помощью зеркал 4, 5 направляется к полупрозрачному фотокатоду 7 опорного фотоумножителя 6, создавая из фотокатода модулированный с частотой f_c электронный поток.

Часть модулированного света доходит до цели, отражается от нее, собирается приемным объективом 3 и направляется к полупрозрачному фотокатоду 10 сигнального фотоумножителя 9. На приемник поступает световой поток F_2 , создавая модулированный с частотой f_c электронный поток.

Фототоки сигнального 9 и опорного 6 фотоумножителей отличаются друг от друга фазой, величина которой пропорциональна измеряемой дальности. Измерением разности фаз определяют дальность.

Однако это очень сложный процесс, поэтому в дальномере предусмотрен блок для снижения частоты полезного сигнала до величины $[f_c - f_r] < 1$ МГц.

Для этого в резонатор вводится сигнал гетеродина с частотой f_r . Тогда в областях электрических полей резонатора возникают большие СВЧ напряжения. Эти напряжения емкостными зазорами 19, 20 подаются на внешние электроды 8, 11, в результате чего каждый из них принимает определенный высокочастотный потенциал. Причем величины этих потенциалов постоянны во всех точках внешних

электродов. В результате этого каждая точка фотокатода находится в идентичном положении, что уменьшает фазовые погрешности.

Напряжения, приложенные к внешним электродам, создают поля, которые проникают через полупрозрачные фотокатоды, и вторично модулируют электронный поток с частотой f_r .

Процесс проникновения полей через полупрозрачные фотокатоды, представляющие резистивные пленки, описан в [5]. Из приведенных в [5] формул легко получить формулу, позволяющую определить нижний предел рабочей частоты, выше которой поля практически без препятствий проникают через фотокатод:

$$f_n = \frac{1}{2R_{\Pi} (C_{01} + C_{02})R^2}, \quad (2)$$

где R_{Π} - сопротивление квадрата резистивного слоя фотокатода; C_{01} , C_{02} - емкости между плоскими электродами, приходящимися на единицу площади; R - радиус внешнего электрода, равный радиусу фотокатода.

Расчеты на основе выражения (2) показывают, что в реальных условиях величина f_n не превышает 1 МГц. Это означает, что для СВЧ полей фотокатод не существует, т.е. он не влияет на структуру СВЧ полей.

В результате двойной модуляции в спектре фототока возникает составляющая разностей $[f_c - f_r]$ частоты, которая усиливается умножительной системой, далее усилителями 16, 17 и подается на фазометр 18.

В данном приборе использованы два фотоумножителя, которые находятся в одинаковых условиях, поэтому изменение внутренних и внешних факторов одинаково влияет на фазы опорного и сигнального фотоумножителей, и тем самым их разность не изменяется. Благодаря этому погрешность данного дальномера приблизительно в два раза меньше погрешности серийного светодальномера ДК 001 и составляет $\sim 0,5$ мм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Большаков В.Д., Деймлих Ф., Голубев А.Н., Васильев В.П.** Радиогеодезические и электро-оптические измерения.- М. : Недра, 1985.-304с.
2. Патент 3.555.281 (США) / **К.А.Гулгазрян, А.П.Скибарко.**
3. **Спиридонов А.И., Кулагин Ю. Н., Крюков Г.С.** Справочник-каталог геодезических приборов. – М. : Недра, 1984. - 240с.
4. Патент N976A2(AM). Լազերային փուլային հեռաչափ / Ա.Վ.Փափազյան, Դ.Կ.Ղուկազարյան, Կ.Ա.Ղուկազարյան. 2001:
5. **Гулгазрян К.А.** Новый способ управления электронным потоком в фотоэлектронных приборах // Радиотехника. - 1970. – N 10 - С. 101 - 102.

Դ.Կ. ՂՈՒԼՂԱԶԱՐՅԱՆ

ԼԱԶԵՐԱՅԻՆ ԸԱՌԱԳԱՑՅՑՄԱՆ ԳԲՀ ՍՈՂՈՒԼՄԱՍԲ ՓՈՒԼԱՅԻՆ ԼՈՒՍԱՀԵՌԱՀԱՓ

Ներկայացված է բարձրագույն ճշտության փուլային հեռաչափի նոր սխեմա: Կիսաալիքային ռեզոնատորում տեղադրված են երկու ֆոտոբազմապատկիչներ այնպես, որ նրանց կիսաթափանց ֆոտոկատոդները գտնվում են ռեզոնատորի էլեկտրական դաշտի տիրույթներում: Ռեզոնատորը գրգռվում է 600 ՄՀց հաճախության հետերոդինի ազդանշաններով: Հենակային ֆոտոբազմապատկիչ է ուղարկվում ԳԲՀ-ով մոդուլված լազերային ճառագայթման մի մասը, իսկ ազդանշանային՝ օբյեկտից անդրադարձած ճառագայթումը: Չափելով ազդանշանային և հենակային ֆոտոռնդունիչների միջանկյալ հաճախության ազդանշանների փուլերի տարբերությունը, որոշում ենք հեռավորությունը: Սարքի՝ հեռավորության չափման սխալը փոքր է մասսայական արտադրության ԴԿ-001 լուսահեռաչափի չափման սխալից և կազմում է $\approx 0,5$ մմ:

D.K.GHULGHAZARYAN

THE PHASE LIGHT RANGE FINDER WITH HF MODULATION OF LASER EMISSION

A new circuit with the utmost accuracy of phase light range finder is represented. Two photomultipliers are installed in half-guide resonator so that their semi-transparent photocathodes are within the electric fields of resonator. The resonator is excited by 600 mHz' heterodyne signals. The part of the HF modulated laser emission is directed to the supporting photomultiplier and the emission, which reflects the target, is directed to the signal photomultiplier. Measuring the phase difference intervening frequency of signal and support photodetector, the range is defined. The error of range measurement is less than the error of range finder ДК-001 measurement which is nearly 0,5 mm.

Р.С. АЙВАЗЯН

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДВИГАТЕЛЕЙ

Предлагается метод сравнительной оценки эффективных показателей дизельных двигателей. Рассматриваются возможности сопоставления различных дизелей и режимов работы с применением параметра “топливонапряженность” двигателей.

Ключевые слова: дизель, эффективные показатели, топливонапряженность, цикловая подача.

Экспериментальные исследования процесса создания и доводки двигателей имеют различные задачи, связанные с доводкой опытного образца, с изучением рабочего цикла и отдельных процессов, определением влияния конструкций как отдельных узлов, так и двигателя в целом.

При доводочных испытаниях, а также сопоставлении опытного дизеля с прототипом или с любым другим дизелем часто прибегают к сравнительной оценке мощностных и экономических показателей двигателя до и после изменения в нем того или иного параметра. При этом необходимо соблюдать условия сопоставимости сравниваемых объектов.

Рассмотрим эти условия на примере определения относительной экономичности опытного дизеля по отношению к прототипу.

Относительная экономичность равна

$$\bar{g}_e = \frac{g_{ц0}}{g_{цп}} \frac{V_{hp}}{V_{h0}} \frac{P_{ep}}{P_{e0}}, \quad (1)$$

где $g_{ц0}$, $g_{цп}$, V_{h0} , V_{hp} ; P_{e0} , P_{ep} – соответственно цикловые расходы топлива, рабочие объемы и средние эффективные давления опытного двигателя и прототипа.

Обозначив в (1) $K_T = g_{ц} / V_h$, получим

$$\bar{g}_e = \frac{K_{T0}}{K_{Tp}} \frac{P_{ep}}{P_{e0}}, \quad (2)$$

где K_T – параметр, представляющий собой удельное количество впрыснутого за цикл топлива, $гp/см^3$, и называемый “топливонапряженностью” рабочего объема двигателя [1].

Согласно (2), относительная экономичность одного двигателя по отношению к другому прямо пропорциональна отношению топливонапряженностей этих двигателей и обратно пропорциональна отношению развиваемых в них средних эффективных давлений. Величину относительной экономичности возможно

определить, задаваясь одним из следующих условий: $P_{eo} = P_{en}$ или $K_{T0} = K_{Tp}$. Если принять первое из двух условий, относительная экономичность выразится соотношением $\bar{g}_e = K_{T0} / K_{Tp}$.

Однако в этом случае идентичность условий сопоставления сравнительных агентов не будет соблюдена. При сравнении по этому же принципу двух различных скоростных режимов одного и того же двигателя будут допущены такие же нарушения идентичности условий сопоставления.

Поясним это на примере. Как известно, с повышением числа оборотов в дизеле механические потери растут. Для выполнения условия $Pe = \text{const}$ необходимо одновременно с повышением числа оборотов повысить топливонапряженность рабочего объема K_t . С другой стороны, при этом цикловой расход топлива имеет тенденцию к увеличению. В результате при $Pe = \text{const}$ с повышением числа оборотов резко падает коэффициент избытка воздуха.

В дизеле А-01 с изменением оборотов от 1200 до 2000 в минуту при сохранении $Pe = \text{const} = 0,6$ МПа это выглядит следующим образом [2]:

$n, \text{мин}^{-1}$	$K_t \times 10^{-4}, \text{гр/см}^3$	α
1200	0,425	1,56
1400	0,436	1,51
1600	0,446	1,47
1800	0,465	1,38
2000	0,488	1,31

Вполне естественно, что столь резкое изменение как K_t , так и коэффициента избытка воздуха α делает совершенно различными условия протекания рабочего процесса в двух соседних скоростных режимах. Поэтому рассматривать полученную таким способом зависимость $\bar{g}_e = f(n)$ как результат влияния числа оборотов мы не вправе. Более того, эта зависимость не имеет практического значения для количественной оценки работы дизеля.

Принцип сопоставления при $Pe = \text{const}$ неприемлем при определении влияния числа оборотов на параметры, не зависящие непосредственно от качества протекания рабочего процесса.

Рассмотрим в качестве примера влияние числа оборотов на среднее давление потерь при газообмене. Известно, что среднее давление потерь при газообмене пропорционально разности работ воздуха на входе, газов на выходе дизеля. При неизменном цикловом расходе топлива с повышением числа оборотов величина этой работы, как показывает опыт, изменяется незначительно. Если сопоставление двух скоростных режимов, с точки зрения потерь при газообмене, проводить при условии $Pe = \text{const}$, то сравниваемые режимы окажутся в различных протеканиях газообмена.

Рассмотрим опытные данные.

Подобное сравнение в дизеле Д-240 с изменением его частоты вращения от 1800-2300 мин^{-1} при условии $Pe = 0,64$ МПа проведено для двух значений угла впрыска топлива. При этом в обоих случаях зафиксирован резкий рост

отрицательной работы на выпуске с ростом числа оборотов, который обусловлен значительным ростом топливнонапряженности K_T .

Таким образом, зависимость, полученная опытным путем, не является результатом чистого влияния числа оборотов.

Для получения искомой зависимости $P_{нх}=f(\pi)$ необходимо соблюдать условие $K_T = \text{const}$.

Приведенные примеры показывают, что сопоставление различных режимов работы одного и того же дизеля или двух дизелей нельзя проводить при $P_e = \text{const}$, которому сопутствует произвольное изменение топливнонапряженности. К тому же среднее эффективное давление, являясь величиной производной, не может служить основой для сравнения различных двигателей и режимов между собой.

В двигателях с всасыванием воздуха из атмосферы единственной независимой переменной является топливнонапряженность рабочего объема дизеля. Поэтому в основу сопоставления следует принять условие $K_T = \text{const}$.

Таким образом, искомую относительную экономичность можно получить лишь при условии одинаковой топливнонапряженности в обоих дизелях, т.е. при $K_{T0} = K_{Tн}$. Тогда

$$\bar{g}_e = P_{eп} / P_{eо} . \quad (3)$$

Иначе говоря, относительная экономичность одного двигателя по отношению к другому определяется отношением средних эффективных давлений, развиваемых в них при одной и той же топливнонапряженности.

Напишем уравнение баланса работы двигателя при заданном K_T [1]:

$$P_e = cK_T \eta_i - P_{мл} , \quad (4)$$

где η_i – индикаторный КПД двигателя; $P_{мл}$ – среднее давление механических потерь; c – постоянная, зависящая от элементарного состава топлива.

Независимой переменной в этом уравнении и является параметр K_T , который, естественно, при определении среднего эффективного давления должен быть одинаковым в сравниваемых двигателях. Однако равенство K_T еще не гарантирует полной идентичности условий сопоставления. Необходимо его дополнить условием равенства параметров воздуха на входе.

Заменив в выражении (2) $K_T = K_B / \alpha \ell_0$ (K_B , по аналогии с K_T , представляет собой количество воздуха в граммах, приходящееся на каждый кубический сантиметр рабочего объема; ℓ_0 – теоретически необходимое количество воздуха для сгорания одного грамма топлива; α – коэффициент избытка воздуха) и $K_B = g_B / V_h$ (g_B – цикловой расход воздуха в граммах), получим $K_T = g_B / V_h \alpha \ell_0$.

Умножив и разделив правую часть этого уравнения на плотность воздуха ρ_K и обозначив $\eta_V = g_B / V_h \rho_K$, получим окончательно

$$K_T = \frac{\eta_V \rho_K}{\alpha \ell_0}. \quad (5)$$

Заменяя далее в (4) значение K_T из (5), получим уравнение баланса работы двигателя с учетом параметров воздуха

$$P_e = c \frac{\eta_V \rho_K}{\alpha \ell_0} \eta_i - P_{мп}. \quad (6)$$

Из (5) очевидно, что условие $K_T = \text{const}$ обуславливает постоянство произведения $\frac{\eta_V}{\alpha} \rho_K$.

Рассмотрим каждый из двух множителей в отдельности. Плотность воздуха ρ_K , как и топливнонапряженность K_T , является независимой переменной. Оба эти параметра составляют внешние условия работы двигателя. Поэтому идентичность условий сопоставления может быть соблюдена только при равенстве этих внешних (задаваемых) параметров в сравниваемых дизелях.

Однако плотность одинаковой величины можно получить при различных сочетаниях давления P_K и температуры T_K . Случайное сочетание этих параметров в сравниваемых дизелях может привести к нарушению условий сопоставимости. Поэтому условия равенства плотности воздуха на входе необходимо заменить условием равенства его давления P_K и температуры T_K . При заданных K_T и ρ_K отношение η_V / α также приобретает постоянство.

Физическую сущность отношения η_V / α можно установить из (5):

$$\frac{\eta_V}{\alpha} = \frac{K_T \ell_0}{\rho_K}.$$

Произведение $K_T \ell_0$ в числителе правой части уравнения представляет собой теоретически необходимое количество воздуха для полного сгорания K_T $г/см^3$ топлива.

Величину ρ_K можно представить как максимальное количество воздуха в граммах, которое могло содержаться в одном кубическом сантиметре рабочего объема при идеальных условиях протекания наполнения (отсутствие гидравлических потерь и теплового воздействия стенок цилиндра и остаточных газов). Тогда отношение η_V / α обратно пропорционально максимально возможному коэффициенту избытка воздуха α_{\max} и прямо пропорционально максимально возможному коэффициенту использования воздуха σ_{\max} при заданных значениях K_T и ρ_K .

Таким образом, условия равенства K_T и ρ_K в сравниваемых двигателях определяют равенство в них максимально возможных степеней использования воздуха.

Максимально возможная степень использования воздуха является потенциальной возможностью. В сравниваемых дизелях эта возможность может быть реализована по-разному.

Из соотношения $\alpha = \eta_v / \text{const}$, вытекающего из (5), видно, что величина действительного коэффициента избытка воздуха зависит от коэффициента наполнения η_v , который в сравниваемых дизелях может быть различным и обусловлен конструктивными параметрами, заложенными в двигатель при его создании.

Таким образом, основными условиями сопоставимости двигателей являются $K_T = \text{const}$; $P_K = \text{const}$; $T_K = \text{const}$.

Написав уравнение баланса в первоначальном его виде (4) для каждого из сравниваемых двигателей, мы можем определить превосходство одного из них по отношению к другому из соотношения

$$\pm \Delta P_e = c \Delta \eta_i - \Delta P_{мп} . \quad (7)$$

Из (7) вытекает, что величина и знак разности средних эффективных давлений зависят исключительно от разности индикаторных и механических потерь в сравниваемых двигателях.

При соблюдении условий сопоставимости можно с помощью соотношения (7) определить величину и знак приращения среднего эффективного давления в двигателе при изменении в нем конструктивных и регулировочных параметров (формы и размеров воздухоподводящих каналов, фаз газораспределения, теплового режима, формы камеры сгорания, законов впрыска и сгорания, числа оборотов и т.д.).

Изменение любого из этих параметров неминуемо отражается на величине баланса работы дизеля. Сказанное относится к отдельно взятым режимам, с помощью которых можно сделать обобщение о преимуществах одного дизеля по отношению к другому.

Изложенный метод оценки эффективных показателей дизелей дает возможность их группирования по потенциальным возможностям их форсирования как по среднему эффективному давлению, так и по числу оборотов, критически осмыслить уровень показателей исследуемого и вновь проектируемого двигателя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Айвазян Р.С.** Определение механических потерь в дизеле по нагрузочным характеристикам // Двигателестроение. – Л., 1983.- N 2. – С. 43-45.
2. Тракторные дизели: Справочник / Под общей ред. **Б.А. Взорова.** - М., 1981. - 451 с.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 15.03.2001.

Ռ.Ս. ԱՅՎԱԶՅԱՆ

ԴԻԶԵԼԱՅԻՆ ՇԱՐԺԻՉՆԵՐԻ ԱՆՎԱՆԱԿԱՆ ՑՈՒՑԱՆԻՇՆԵՐԻ ՀԱՄԵՄԱՏԱԿԱՆ ԳՆԱՀԱՏՈՒՄԸ

Առաջարկվում է դիզելային շարժիչների համեմատական գնահատման նոր մեթոդ, որտեղ լուսաբանվում են տարբեր դիզելների և նրանց ռեժիմների համադրումը՝ կիրառելով վառելիքալարվածությունը պարամետրը:

R.S. AYVAZYAN

COMPARATIVE EVALUATION OF EFFECTIVE DIESEL ENGINE INDICES

A comparative evaluation of effective diesel engine indices is proposed. Comparison possibilities of different diesels and working modes using “fuel strength engine” parameters are considered.



INTAS

Euro 25.2 million for INTAS actions in 2003

On 7 March 2003, INTAS officially launched its **Open Call 2003** with an indicative budget of Euro 18.2 million and its four **Collaborative Calls 2003**, each with an indicative budget of Euro 1 million:

- ✓ **INTAS OPEN Call 2003:** INTAS welcomes proposals for research projects and networks related to all scientific fields, both fundamental and applied research.
- ✓ **INTAS – Belarus Call 2003:** INTAS welcomes proposals in all areas of science, both fundamental and applied research.
- ✓ **INTAS – ¹CERN Call 2003:** INTAS welcomes proposals related to the physics and engineering of the Large Hadron Collider at CERN.
- ✓ **INTAS – ²CNES Call 2003:** INTAS welcomes proposals in the field of spacecraft research and technology.
- ✓ **INTAS – ³GSI Call 2003:** INTAS welcomes proposals related to the development of accelerators or experiments for the new International Accelerator Facility for Beams of Ions and Antiprotons at GSI, Darmstadt, Germany.

In all cases, the deadline for submission is **13 June 2003, 13H00 Brussels time**.

INTAS also launched its call for **Young NIS Scientist Fellowships** (Euro 2.5 million) and its call for **Innovation Grants 2003** (Euro 500,000) on 7 March 2003, each with a deadline for submission of **11 July 2003, 13H00 Brussels time**.

<p style="text-align: center;">PROJECT FUNDING BY INTAS IS SUBJECT TO THE AVAILABILITY OF APPROPRIATIONS BY THE EUROPEAN COMMUNITIES' FRAMEWORK PROGRAMME</p>

An information package consisting of the General Rules and a Technical Guide on the electronic submission for each of the actions can be obtained via:

Internet address: <http://www.intas.be>, section "Funding Opportunities"
If you experience problems in downloading the information package please contact the
INTAS Secretariat at: infopack@intas.be.

As INTAS expects a high number of proposals, the Association also welcomes applications from scientific experts who wish to contribute to the INTAS system of peer review of the submitted proposals. If you are interested to act as an evaluator, please visit our web site on www.intas.be under the section "Evaluators".

For more information about INTAS, please contact the Public Relations Team at info@intas.be or by fax: +32-2-549 01 56, or check our web site at <http://www.intas.be>.

You may also contact INTAS information Desk in Armenia at Bioecommed NGO. Address: 7 Hasratyan St, 375014, Yerevan, RA; tel/fax: 3741 282061; E-mail: bioecom@mb.sci.am; <http://www.bioecommed.am>.

Notes. All correspondence with and all submissions of proposals to INTAS must be made in English.

¹ The European Organisation for Nuclear Research; Switzerland, Geneva; <http://public.web.cern.ch>

² Centre National d' Etudes Spatiales (The French Space Agency); Toulouse, France; <http://www.CNES.fr>

³ Gesellschaft für Schwerionenforschung (Heavy Ion Research Center); Darmstadt, Germany; <http://www.GSI.de>

2003թ. ԻՆՏԱՍ-ի գործունեության համար հատկացված է 25.2 միլիոն Եվրո

2003թ. մարտի 7-ին ԻՆՏԱՍ-ը պաշտոնապես հայտարարեց իր 2003թ. մրցույթների մեկնարկը. «Բաց Մրցույթ» (ընդհանուր բյուջեն կազմում է 18.2 միլիոն Եվրո) և չորս «Համատեղ Մրցույթներ» (յուրաքանչյուրի բյուջեն կազմում է 1 միլիոն Եվրո).

- ✓ ԻՆՏԱՍ-ի 2003թ. Բաց Մրցույթ. ԻՆՏԱՍ-ը ողջունում է գիտական նախագծերի և ցանցերի շրջանակներում առաջարկներ՝ բոլոր գիտական ուղղություններով, հիմնարար և կիրառական ուղղվածությամբ:
- ✓ ԻՆՏԱՍ-ի և Բելառուսի 2003թ. Համատեղ Մրցույթ. ԻՆՏԱՍ-ը ողջունում է առաջարկներ բոլոր գիտական ուղղություններով՝ հիմնարար և կիրառական ուղղվածությամբ:
- ✓ ԻՆՏԱՍ-ի և CERN-ի 2003թ. Համատեղ Մրցույթ. ԻՆՏԱՍ-ը ողջունում է առաջարկներ ֆիզիկա-տեխնիկական գիտությունների ոլորտում, որոնք վերաբերում են Մեծ Անդրոնային Կոլայդերին՝ Եվրոպական միջուկային հետազոտությունների կազմակերպության (CERN, Ժնև, Շվեյցարիա, <http://public.web.cern.ch>) արագացուցչին:
- ✓ ԻՆՏԱՍ-ի և CNES-ի 2003թ. Համատեղ Մրցույթ. ԻՆՏԱՍ-ը ողջունում է գիտահետազոտական և տեխնոլոգիական ուղղվածություն ունեցող առաջարկներ օդագնաց տիեզերական նավերի վերաբերյալ: Մրցույթն անցկացվում է Ֆրանսիայի Կոսմիկական հետազոտությունների ազգային կենտրոնի հետ համատեղ (CNES, Տուլուզ, <http://www.CNES.fr>):
- ✓ ԻՆՏԱՍ-ի և CNES-ի 2003թ. Համատեղ Մրցույթ. ԻՆՏԱՍ-ը ողջունում է այն առաջարկները, որոնք վերաբերում են արագացուցիչների կատարելագործմանը կամ փորձարարական աշխատանքներին՝ Ծանր իոնների գիտահետազոտական կենտրոնի (GSI, Դարմշտադ, Գերմանիա, <http://www.GSI.de>) նոր «Արագացված իոնների և հակապրոտոնների փնջերի արագացուցչային համալիրում»:

Առաջարկների ներկայացման վերջին ժամկետն է հունիսի 13, 2003թ., 13:00 Բրյուսելի ժամանակով:

2003թ. մարտի 7-ին ԻՆՏԱՍ-ը նաև հայտարարեց իր Դրամաշնորհներ Նոր Անկախ Պետությունների երիտասարդ գիտնականների համար (2.5 միլիոն Եվրո) և Ինովացիոն Դրամաշնորհներ (500 000 Եվրո) մրցույթները: Երկուսի դեպքում էլ առաջարկների ներկայացման վերջին ժամկետն է հուլիսի 11, 2003թ., 13:00 Բրյուսելի ժամանակով:

ԻՆՏԱՍ-ը ֆինանսավորում է նախագծեր Եվրոպական Սիության Շրջանակային Ծրագրի դրամական միջոցներից

«Ընդհանուր դրույթներից» և «Առաջարկների էլեկտրոնային ներկայացման տեխնիկական ձեռնարկից» բաղկացած տեղեկատվական փաթեթը յուրաքանչյուր մրցույթի վերաբերյալ կարելի է կորզել ԻՆՏԱՍ-ի Ինտերնետային էջից՝ հետևյալ հասցեով. <http://www.intas.be>, "Funding Opportunities" բաժինը:

Դժվարությունների դեպքում դիմեք ԻՆՏԱՍ-ի քարտուղարություն՝ infopack@intas.be հասցեյով:

Քանի որ սպասվում են մեծ քանակությամբ առաջարկներ, ԻՆՏԱՍ-ը հրավիրում է գիտնականներին՝ մասնակցելու վերջիններիս փորձաքննմանը: Ցանկացողներին խնդրում ենք այցելել մեր Ինտերնետային էջը www.intas.be հասցեով, "Evaluators" բաժինը:

ԻՆՏԱՍ-ի մասին մանրամասն տեղեկություններ ստանալու նպատակով Դուք կարող եք դիմել մեր Հասարակության հետ կապերի խմբին էլեկտրոնային փոստի՝ info@intas.be, կամ ֆաքսի՝ +32-2-549 01 56 միջոցով կամ այցելել մեր Ինտերնետային էջը՝ <http://www.intas.be>:

Դուք կարող եք դիմել նաև Հայաստանում ԻՆՏԱՍ-ի տեղեկատվական և խորհրդատվական գրասենյակ:
Հասցեն. ՀՀ, ք. Երևան, Հասրաթյան փ., 7, Բիոէկոմոդ ՀԿ; հեռ/ֆաքս. 3741 282061; էլ. փոստ. bioecom@mb.sci.am; <http://www.bioecomed.am>:

ԻՆՏԱՍ-ի հետ նամակագրությունը և ԻՆՏԱՍ ներկայացվող բոլոր առաջարկները կազմվում են անգլերենով:

Անգլերենից տվյալ տեքստի թարգմանությունը կատարվել է Բիոէկոմոդ ՀԿ կողմից:



INTAS

На деятельность ИНТАС в 2003г. выделено 25.2 миллионов Евро

7 марта 2003г. ИНТАС официально объявил о начале своих конкурсов на 2003г.: "Открытом Конкурсе" (общий бюджет 18.2 миллионов Евро) и четырех "Совместных конкурсах" (бюджет каждого из них составляет 1 миллион Евро).

✓ **Открытый Конкурс ИНТАС 2003:** ИНТАС приветствует предложения в рамках научных проектов и сетей по фундаментальным и прикладным аспектам всех научных дисциплин.

✓ **Совместный конкурс ИНТАС-Беларусь 2003:** ИНТАС приветствует предложения по фундаментальным и прикладным аспектам всех научных дисциплин.

✓ **Совместный конкурс ИНТАС-CERN 2003:** ИНТАС приветствует предложения в области физико-технических наук, относящиеся к Большому Андронному Коллайдеру - ускорителю частиц в Европейской организации по ядерным исследованиям (CERN; Женева, Швейцария; <http://public.web.cern.ch>).

✓ **Совместный конкурс INTAS-CNES 2003:** ИНТАС приветствует предложения, имеющие научно-исследовательскую и технологическую направленность, в области космических кораблей. Конкурс проводится совместно с Национальным центром космических исследований Франции (CNES; Тулуза; <http://www.CNES.fr>).

✓ **Совместный конкурс INTAS-GSI 2003:** ИНТАС приветствует предложения, относящиеся к усовершенствованию ускорителей, либо проведению экспериментальных работ в рамках нового "Ускорительного комплекса для получения пучков ускоренных ионов и антипротонов" в Научно-исследовательском центре тяжелых ионов (GSI; Дармштад, Германия; <http://www.GSI.de>).

Конечный срок подачи заявок для всех конкурсов: **13 июня 2003г. в 13:00 по брюссельскому времени.**

7 марта 2003г. ИНТАС также объявил о начале своих конкурсов - **Стипендии для молодых ученых ННГ (2.5 миллионов Евро)** и **Инновационные гранты (500 000 Евро)**. Конечный срок подачи заявок по каждому конкурсу: **11 июля 2003г. в 13:00 по брюссельскому времени.**

**ИНТАС финансирует проекты на ассигнования Рамочной
Программы Европейского Сообщества**

Информационный пакет, состоящий из "Общих положений" и "Технического руководства по электронной подаче предложений", по каждому из конкурсов можно загрузить из Интернетовского сайта ИНТАС по адресу: <http://www.intas.be>, раздел "Funding Opportunities".

Если у Вас возникнут проблемы с загрузкой, обращайтесь в Секретариат ИНТАС по адресу: infopack@intas.be.

Поскольку ожидается поступление большого количества предложений, ИНТАС приглашает ученых принять участие в экспертной оценке последних. Желающих просим посетить наш сайт в Интернете по адресу: www.intas.be, секция "Evaluators".

В целях получения подробной информации об ИНТАС вы можете обратиться в наш отдел по связям с общественностью по электронной почте: info@intas.be или факсу: +32-2-549 01 56, либо посетить наш веб-сайт: <http://www.intas.be>.

Вы также можете обратиться в Информационную службу ИНТАС в Армении.

Адрес: РА, г. Ереван, ул. Асратяна, 7, ОО Биоэкомед; тел/факс: 3741 282061; эл. почта: bioecom@mb.sci.am; <http://www.bioecommed.am>.

Примечание. Вся корреспонденция с ИНТАС и предложения по конкурсам, представляемые в ИНТАС, должны быть составлены на английском языке.

Настоящий текст переведен с английского персоналом ОО Биоэкомед.

ԲՈՎԱՆԴԱԿՈՒԹՅՈՒՆ

ՄԱՐԳՍՅԱՆ Ն.Ե., ՄԱՐԳՍՅԱՆ Ն.Ն.
 ՀՈԳՆԱԾՄԱՅԻՆ ՃԱՔԵՐԻ ՏԱՐԱԾՄԱՆ ԱՌԱՆՁՆԱՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԸ ԼԱՐՄԱՆ ԽՏԱՐԱՐԻ ՄՈՏԵՐՔՈՒՄ ԿՈՄՊՈԶԻՏՄԱՅԻՆ ՆՅՈՒԹԵՐԻ ԱՌԱՆՑՔԱՅԻՆ ՁԳՄԱՆ ԴԵՊՔՈՒՄ 3

ՄՏԱԿՅԱՆ Մ.Գ., ԴԵՄԻՐՊԱՆՅԱՆ Ա.Ռ.
 ՀՈԳՆԱԾՄԱՅԻՆ ԿՈՐԻ ՀԱՎԱՍԱՐՈՒՄԸ ԵՐԿԱՐԱԿԵՑՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՁԳԱՅՆՈՒԹՅԱՆ ՇԵՄԻ ՀԱՇՎԱՌՄԱՄԲ
 Հաղորդում 2. Հոգնածային քվանտիլային կորերի ընտանիքները և դրանց վստահական միջակայքերը 8

ՊԱՊՈՅԱՆ Ա.Ռ.
 ՀԱՄԱՌԱՆՑՔ ՌՈՏՈՐՆԵՐԸ ՏԵՔՍՏԻԼ ՄԵՔԵՆԱՆԵՐԻ ԱՐԱԳԸՆԹԱՑ ԱՇԽԱՏԱՆՔԱՅԻՆ ՕՐԳԱՆՆԵՐՈՒՄ ԵՎ ԴԻԱՆՑ
 ՀԱՎԱՍԱՐԱԿՇՈՒԹՅԱՆ ԴԻՐՔԻ ԿԱՅՈՒՆՈՒԹՅՈՒՆԸ 17

ՊՈՂՈՍՅԱՆ Ա.Կ., ԲԱԽՇՅԱՆ Ա.Օ., ԹԱՄՐԱԶՈՎ Ա.Ա.
 ԱՎՏՈՏՐԱՆՄՊՈՐՏԱՅԻՆ ՄԻՋՈՑՆԵՐԻ ՍԿԱՎԱՌԱԿԱԿՈՃՂԱԿԱՎՈՐ ԱՐԳԵԼԱԿՆԵՐԻ ԹՐԹՈՒԿԱՅՈՒՆՈՒԹՅԱՆ ՀԱՇՎԱՐԿԸ 25

ՄՂԲԱԼՅԱՆ Ս.Գ., ԵՂԻԱԶԱՐՅԱՆ Ռ.Ս.
 ՋԵՐՄԱՑԻԿԼԻԿ ՄՇԱԿՄԱՄԲ ՄՏԱՅՎԱԾ ԿՈՆԵԼԻ ԹՈՒՋԻ ՄԵԽԱՆԻԿԱԿԱՆ ՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԸ 31

ՆԱԶԱՐՅԱՆ Է.Ա., ԽԱՆԴԱՆՅԱՆ Ա.Ժ., ԱՌԱՔԵԼՅԱՆ Մ.Մ.
 ԹԵՐԹԱՅԻՆ ՍՈԼԻԲԴԵՆԻ ՏԵԽՆՈԼՈԳԻԱԿԱՆ ՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՄԱՍԻՆ 36

ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ Հ.Ս.
 ՓՈՇԵՄԵՏԱԼՈՒԻՐԳԻԱԿԱՆ ԵՂԱՆԱԿՈՎ ՄՏԱՅՎԱԾ ՏԻՏԱՆԻ ԵՎ ՆՐԱ ՀԱՄԱԶՈՒԼՎԱԾՔՆԵՐԻ ՄԵԽԱՆԻԿԱԿԱՆ ՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԸ 41

ՄԱՍՅԱՆ Ս.Գ.
 ԲԱՐՁՐՋԵՐՄԱՍՏԻՃԱՆԱՅԻՆ ՋԵՐՄԱՄԵԽԱՆԻԿԱԿԱՆ ՄՇԱԿՄԱՆ (ԲԶԶՄ) ԿԻՐԱՌՄԱՄԲ ՓՈՇԵՄԵՏԱԼՈՒԻՐԳԻԱՅԻ ՄԵԹՈՂՈՎ ՇԵՐՏԱՎՈՐ ՊՈՂՊԱՏՆԵՐԻ ՄՏԱՑՄԱՆ ՏԵԽՆՈԼՈԳԻԱՅԻ ԱՌԱՆՁՆԱՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԸ 46

ՀԱՅՐԱՊԵՏՅԱՆ Մ.Մ., ՄԱՆՈՒԿՅԱՆ Լ.Ս., ԲԱԲԱՆՈՎԱ Ա.Ս., ՏՈՆՈՅԱՆ Ա.Հ., ԴԱՎԹՅԱՆ Ս.Պ.
 ԱԿՐԻԼԱՄԻԴԻ ՖՐՈՆՏԱԼ ԻՆԻՑՎԱԾ ՌԱԴԻԿԱԼԱՅԻՆ ՊՈԼԻՄԵՐԱՑՄԱՆ ԱՌԱՆՁՆԱՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԸ 52

ՄԱԼԽԱՍՅԱՆ Ս.Ա., ԳԵԴԱԿՅԱՆ Ջ.Ա., ՄԱԼԽԱՍՅԱՆ Վ.Ս.
 ԵՐԿԱԹԻ ՀԻՄՔՈՎ ԵՌԱԿԱԼՎԱԾ ԿՈՄՊՈԶԻՑԻԱՆԵՐԻ ԴԵՐԻՎԱՏՈԳՐԱՖԻԿ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԸ 61

ԱԼԵՔՍԱՆԴՐՅԱՆ Կ.Վ., ԽԱՆՈՅԱՆ Ռ.Գ.
 ԱՌԱՆՑՔԱՅԻՆ ՊՏՎՈՂ ՀՊՈՒՄԱՅԻՆ ՋԵՐՄԱՓՈԽԱՆԱԿՉԻ ՀԱՐԹ ՋՐԱՇԻԹԱՅԻՆ ԹԵՎԵՐԻ ՈՒՂՂԱՆԿՅԱՆ ՏԵՍՔՈՎ ԿԱԶՄԱՎՈՐՄԱՆ ՊԱՅՄԱՆԻ ՄԱՀՄԱՆՈՒՄԸ 66

ԽԱԶԱՏՐՅԱՆ Վ.Ս., ԹԱՄՐԱԶՅԱՆ Մ.Գ., ՄԱՐԳՍՅԱՆ Դ.Է.
 ԷԼԵԿՏՐՈՆԱԿԱՆ ՑԱՆՅԻ ԿԱՌՈՒՑՎԱԾՔԻ ՕՊՏԻՄԱԼԱՑՄԱՆ ՄԵԹՈՂ 74

ՀԱՐՈՒԹՅՈՒՆՅԱՆ Ա.Գ.
 ԱՐՏԱԴՐԱԿԱՆ ԵՎ ԱՐՏԱՔԻՆ ԼՈՒՍԱՎՈՐՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆՅԵՐԻ ՄՆՄԱՆ ԱՐԴՅՈՒՆԱՎԵՏ ԵՂԱՆԱԿ 81

ԽԱՉԱՏՐՅԱՆ Կ.Վ., ԲՈՐՈՅԱՆ Ա.Վ.	
ԷԼԵԿՏՐԱԷՆԵՐԳԵՏԻԿԱԿԱՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳԻ ԿԱՅՈՒՆԱՑՎԱԾ ՌԵԺԻՄԻ ՃՇԳՐՏՈՒՄԸ P-U և P-Q ՏԵՍՔԻ ԿԱՅԱՆԱՅԻՆ ՀԱՆԳՈՒՅՑՆԵՐԻ ԴԵՊՔՈՒՄ	86
ԱՐՇԱԿՅԱՆ Դ.Թ., ԽՈՍՏԻԿՅԱՆ Գ.Մ.	
ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԶԱՐԳԱՑՈՂ ԷԼԵԿՏՐԱԷՆԵՐԳԵՏԻԿԱԿԱՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳԻ ԻՄԻՏԱՑԻՈՆ ՄՈՂԵԼ	94
ՆԵՐՄԻՍՅԱՆ Վ.Բ.	
ՈՉ ՖԵՌՈՄԱԳՆԻՄԱԿԱՆ ՀԱՂՈՐԴԻՉ ԹԻԹԵՂԻ ՀԱՍՏՈՒԹՅԱՆ ԵՎ ՇԱՐԺՄԱՆ ԱՐԱԳՈՒԹՅԱՆ ՄՐՐԿԱՀՈՍԱՆՔԱՅԻՆ ՉԱՓԻՉԻ ԱՇԽԱՏԱՆՔԸ ԴԻՆԱՄԻԿ ՌԵԺԻՄՈՒՄ	101
ԿՅՈՒՐԵՂՅԱՆ Ս.Գ., ՄՍՄԻԿՈՆՅԱՆ Բ.Մ., ՇՄԵԼՅՈՎ Վ.Կ., ԱԲԳԱՐՅԱՆ Ս.Վ., ԲԱԼԱՍՄԱՆՅԱՆ Ս.Շ.	
ՍՈԼԻԲԻԵՆԱՅԻՆ ՀԱՆՔԱՆՅՈՒԹԻ ՀԱՐՍՏԱՑՄԱՆ ՖԼՈՏԱՅԻՈՆ ԳՈՐԾԸՆԹԱՑԻ ԴԵԿԱՎԱՐՄԱՆ ՀԱՐՑԻ ՎԵՐԱԲԵՐՅԱԼ	107
ԲԱՂԴԱՍՍԱՐՅԱՆ Վ.Վ., ՀԱՐՈՒԹՅՈՒՆՅԱՆ Վ.Վ.	
ՄԻԳՐԱՑԻՈՆ ՀՈՍՔԵՐԻ ՄՈՆԻԹՈՐԻՆԳԻ ԵՎ ՄԵՆԵՉՄԵՆԹ ՈՐՈՇՈՒՄՆԵՐԻ ԸՆԴՈՒՆՄԱՆ ԴԻՆԱՄԻԿ ՄՈՂԵԼԸ	114
ՄԱՀԱԿՅԱՆ Հ.Գ.	
ՕՊՏԻՄԱԼ ՈՐՈՇՈՒՄՆԵՐԻ ԸՆԴՈՒՆՄԱՆ ԲԱԶՄԱԿՐԻՏԵՐԻԱԼ ԴԻՆԱՄԻԿ ԽՆԴԻՐԻ ԼՈՒԾՄԱՆ ՄԻ ՄԵԹՈԴԻ ՄԱՍԻՆ	120
ՀԱՐՈՒԹՅՈՒՆՅԱՆ Վ.Հ., ԲՈԶՈՅԱՆ Շ.Ե., ՔՈՉԱՐՅԱՆ Ա.Ա.	
ՕՊՏԻԿԱՊԵՍ ԹԱՓԱՆՑԻԿ ԼՈՒԾՈՒՅԹՆԵՐՈՒՄ ԽԱՌՆՈՒՐԴՆԵՐԻ ԽՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՈՐՈՇՄԱՆ ՄԵԹՈԴ	126
ՔՈՉԱՐՅԱՆ Ս.Կ.	
ՄԵՂՄՄԱՆ ԳՈՐԾԸՆԹԱՑՆԵՐԻ ՄՈՂԵԼԱՎՈՐՈՒՄԸ ՀԱՄԱԶԱՅՆ MPEG-2 ՄՍԱՆԴԱՐՏԻ	130
ՇԱՂԳԱՍՅԱՆ Ա.Ս.	
ՈՉ ԳԾԱՅԻՆ ԹԻՎ-ԱՆԱԼՈԳԱՅԻՆ ԿԵՐՊԱՓՈՒԽՉ	136
ԽՈՒԴԱՎԵՐԴՅԱՆ Ս. Խ.	
ՖՈՏՈՀՈՍԱՆՔԻ ՄՊԵԿՏՐԱԼ ԲԱՇԽՎԱԾՈՒԹՅԱՆ ԱՌԱՆՁՆԱՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԸ CdTe ԿԱՌՈՒՅՎԱԾՔՆԵՐՈՒՄ ...	142
ՀԱՐՈՒԹՅՈՒՆՅԱՆ Հ.Հ.	
ՄԻԼԻՑԻԴ-ՄԻԼԻՑԻՈՒՄ-ՄԻԼԻՑԻԴ ԿԱՌՈՒՅՎԱԾՔՆԵՐԻ ՖՈՏՈԷԼԵԿՏՐԱԿԱՆ ՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՈՒՍՈՒՄՆԱՍԻՐՈՒՄ ..	149
ԲԱԼԱՅԱՆ Հ.Լ.	
ԱԿՏԻՎ ՓՈՒԼԱՎՈՐԿԱԾ ԱՆՏԵՆԱՅԻՆ ՑԱՆՑԻ ՀԱՂՈՐԴՈՂ - ԸՆԴՈՒՆՈՂ ՄՈՂՈՒԼԻ ԿԱՌՈՒՅՎԱԾՔԱՅԻՆ ՄԽԵՄԱ	153
ՂՈՒԼՂԱԶԱՐՅԱՆ Դ.Կ.	
ԼԱԶԵՐԱՅԻՆ ՃԱՌԱԳԱՅԹՄԱՆ ԳԲՀ ՄՈՂՈՒԼՄԱՍԲ ՓՈՒԼԱՅԻՆ ԼՈՒՍԱՀԵՌԱԶՈՓ	157
ԱՅՎԱԶՅԱՆ Ռ.Ս.	
ԴԻԶԵԼԱՅԻՆ ՇԱՐԺԻՉՆԵՐԻ ԱՆՎԱՆԱԿԱՆ ՑՈՒՑԱՆԻՇՆԵՐԻ ՀԱՄԵՄԱՏԱԿԱՆ ԳՆԱՀԱՏՈՒՄԸ	161

СОДЕРЖАНИЕ

<i>САРКИСЯН Н.Е., САРКИСЯН Н.Н.</i> ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА РАСПРОСТРАНЕНИЯ УСТАЛОСТНЫХ ТРЕЩИН ВБЛИЗИ КОНЦЕНТРАТОРА НАПРЯЖЕНИЙ В КОМ- ПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛАХ ПРИ ИХ ОСЕВОМ РАСТЯЖЕНИИ	3
<i>СТАКЯН М.Г., ДЕМИРХАНЫАН А.Р.</i> УРАВНЕНИЕ КРИВОЙ УСТАЛОСТИ С УЧЕТОМ ПОРОГА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ПО ДОЛГОВЕЧНОСТЯМ Сообщение 2. Семейства квантильных кривых усталости и их доверительных интервалов	8
<i>ПАПОЯН А. Р.</i> СООСНЫЕ РОТОРЫ В ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ РАБОЧИХ ОРГАНАХ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАШИН И УСТОЙЧИВОСТЬ ИХ ПОЛОЖЕНИЯ РАВНОВЕСИЯ	17
<i>ПОГОСЯН А.К., БАХШЯН А.О., ТАМРАЗОВ А.А.</i> РАСЧЕТ ВИБРОУСТОЙЧИВОСТИ ДИСКОВО-КОЛОДОЧНЫХ ТОРМОЗОВ АВТОТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ	25
<i>АГБАЛЯН С. Г., ЕГИАЗАРЯН Р. С.</i> МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОВКОГО ЧУГУНА, ПОЛУЧЕННОГО ПРИ ТЕРМОЦИКЛИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ	31
<i>НАЗАРЯН Э.А., ХАНДАНЯН А.Ж., АРАКЕЛЯН М.М.</i> О ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВАХ ЛИСТОВОГО МОЛИБДЕНА .	36
<i>ПЕТРОСЯН А.С.</i> МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТИТАНА И ЕГО СПЛАВОВ, ПОЛУЧЕННЫХ ПОРОШКОВОЙ МЕТАЛЛУРГИЕЙ	41
<i>МАМЯН С.Г.</i> ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ СЛОИСТЫХ СТАЛЕЙ МЕТОДОМ ПОРОШКОВОЙ МЕТАЛЛУРГИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ТЕРМОМЕХАНИ- ЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ	46
<i>АЙРАПЕТАН С.М., МАНУКЯН Л.С., БАБАНОВА А.С., ТОНОЯН А.О., ДАВТЯН С.П.</i> ОСОБЕННОСТИ ФРОНТАЛЬНОЙ ИНИЦИИРОВАННОЙ РАДИКАЛЬНОЙ ПОЛИМЕРИЗАЦИИ АКРИЛАМИДА	52
<i>МАЛХАСЯН С.А., ГЕДАКЯН Дж.А., МАЛХАСЯН В.С.</i> ДЕРИВАТОГРАФИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СПЕЧЕННЫХ КОМПОЗИЦИЙ НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА	61
<i>АЛЕКСАНДРЯН К.В., ХАНОЯН Р.Г.</i> ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ ПЛОСКОЖИДКОСТНЫХ ЛОПАСТЕЙ ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ФОРМЫ ВРАЩАЮЩЕГОСЯ ОСЕВОГО КОНТАКТНОГО ТЕПЛООБМЕННИКА	66
<i>ХАЧАТРЯН В.С., ТАМРАЗЯН М.Г., САРКИСЯН Д.Э.</i> МЕТОД ОПТИМИЗАЦИИ СТРУКТУРЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ	74
<i>АРУТЮНЯН А.Г.</i>	

ЭФФЕКТИВНЫЙ СПОСОБ ПИТАНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ И НАРУЖНОЙ ОСВЕТИТЕЛЬНОЙ СЕТИ	81
<i>ХАЧАТРЯН К.В., БОРОЯН А.В.</i>	
КОРРЕКЦИЯ УСТАНОВИВШЕГОСЯ РЕЖИМА	
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПРИ P-U И P-Q ТИПАХ СТАНЦИОННЫХ УЗЛОВ	86
<i>АРШАКЯН Д.Т., ХОСТИКЯН Г.М.</i>	
ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ РАЗВИВАЮЩЕЙСЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ АРМЕНИИ	94
<i>НЕРСИСЯН В.Б.</i>	
ДИНАМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ РАБОТЫ ВИХРЕТОКОВОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ ТОЛЩИНЫ И СКОРОСТИ ПРОКАТКИ НЕФЕРРОМАГНИТНОЙ ПРОВОДЯЩЕЙ ПОЛОСЫ	101
<i>КЮРЕГЯН С.Г., МАМИКОНЯН Б.М., ШМЕЛЕВ В.К., АБГАРЯН С.В., БАЛАСАНИЯН С.Ш.</i>	
К ВОПРОСУ ОБ УПРАВЛЕНИИ ФЛОТАЦИОННЫМ ПРОЦЕССОМ ОБОГАЩЕНИЯ МОЛИБДЕНОВОЙ РУДЫ	107
<i>БАГДАСАРЯН В.В., АРУТЮНЯН В.В.</i>	
ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ДЛЯ МОНИТОРИНГА И МЕНЕДЖМЕНТА МИГРАЦИОННЫХ ПОТОКОВ	114
<i>СААКЯН А.Г.</i>	
ОБ ОДНОМ МЕТОДЕ РЕШЕНИЯ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ ЗАДАЧИ ПРИНЯТИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ РЕШЕНИЙ .	120
<i>АРУТЮНЯН В.А., БОЗОЯН Ш.Е., КОЧАРЯН А.А.</i>	
МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ПРИМЕСЕЙ В ОПТИЧЕСКИ ПРОЗРАЧНЫХ РАСТВОРАХ	126
<i>КОЧАРЯН С. К.</i>	
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СЖАТИЯ ПО СТАНДАРТУ MPEG-2 ..	130
<i>ШАХКАМЯН А.С.</i>	
НЕЛИНЕЙНЫЙ ЦИФРО-АНАЛОГОВЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ	136
<i>ХУДАВЕРДЯН С.Х.</i>	
ОСОБЕННОСТИ СПЕКТРАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ФОТОТОКА В СТРУКТУРАХ НА ОСНОВЕ CdTe	142
<i>АРУТЮНЯН А.А.</i>	
ИЗУЧЕНИЕ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СИЛИЦИД-СИЛИЦИУМ-СИЛИЦИД СТРУКТУР	149
<i>БАЛАЯН Г.Л.</i>	
СТРУКТУРНАЯ СХЕМА ПРИЕМОПЕРЕДАЮЩЕГО МОДУЛЯ АКТИВНОЙ ФАЗИРОВАННОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ	153
<i>ГУЛГАЗАРЯН Д.К.</i>	
ФАЗОВЫЙ СВЕТОДАЛЬНОМЕР С СВЧ МОДУЛЯЦИЕЙ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ	157
<i>АЙВАЗЯН Р.С.</i>	
СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДВИГАТЕЛЕЙ	161

CONTENTS

SARGSYAN N.E., SARGSYAN N.N.	
FATIGUE CRACK DIFFUSION IN PECULIARITIES NEAR THE STRESS CONCENTRATOR IN COMPOSITE MATERIALS DURING THEIR AXIAL TENSION	3
STAKYAN M. G., DEMIRKHANYAN A.R.	
EQUATION OF STRESS-CYCLE DIAGRAM WITH ACCOUNT OF LONGEVITY SENSITIVITY THRESHOLD Report 2. A Family of quantum fatigue curves and their confidence intervals	8
PAPOYAN A.R.	
COAXIAL ROTORS IN HIGH – SPEED WORKING ORGANS OF TEXTILE MACHINES AND THEIR EQUILIBRIUM POSITION STABILITY	17
POGOSIAN A.K., BAKHSHYAN A.O., TAMRAZOV A.A.	
VIBROSTABILITY CALCULATION OF DISK-PAD BRAKE VEHICLES	25
AGBALYAN S. G., YEGHIAZARYAN R. S.	
MECHANICAL PROPERTIES OF THE PIG IRON, OBTAINED BY THERMOCYCLIC TREATMENT	31
NAZARYAN E.A., KHANDANYAN A.G., ARAKELYAN M.M.	
ON TECHNOLOGICAL CHARACTERISTICS OF SHEET MOLIBDENIUM	36
PETROSSYAN H.S.	
MECHANICAL PROPERTIES OF THE TITANIUM AND ITS ALLOYS OBTAINED BY POWDER METALLURGY	41
MAMYAN S.G.	
TECHNOLOGICAL CHARACTERISTICS FOR OBTAINING FLAKY STEELS BY POWDER METTALURGY METHOD USING HIGH- TEMPERATURE THERMOMECHANICAL TREATMENT	46
HAYRAPETYAN S.M., MANUKYAN L.S., BABANOVA A.S., TONOYAN A.O., DAVTYAN S.P.	
PECULIARITIES OF THE INITIATED RADICAL FRONTAL ACRYL- AMIDE POLYMERIZATION	52
MALKHASSYAN S.A., GEDAKYAN J.A., MALKHASSYAN V.S.	
DERIVATOGRAPHICAL STUDIES IN SINTERED COMPOSITION BASED ON IRON	61
ALEXANDRYAN K.V., KHANOYAN R.G.	
CONDITION FORMING DEFINITION FOR FLAT LIQUID RECTANGULAR ROTATION AXLE CONTACT HEAT EXCHANGER	66
KHACHATRYAN V.S., TAMRAZYAN M.G., SARKISSYAN D.E.	
ELECTRIC NETWORK STRUCTURE OPTIMIZATION METHOD ...	74
HARUTIUNYAN A.G.	
EFFICIENT WAY OF SUPPLYING INDUSTRIAL AND OUTDOOR LIGHTING	81
KHACHATRYAN K.V., BOROYAN A.V.	
STEADY-STATE CONDITION CORRECTION OF ELECTRIC POWER SYSTEM (EPS) in P-U AND P-Q TYPES OF STATION	

NODES	86
ARSHAKYAN D.T., KHOSTIKYAN G.M.	
IMITATION MODEL FOR DEVELOPING POWER STATIONS IN ARMENIA	94
NERSISSYAN V.B.	
DYNAMIC WORKING CONDITIONS FOR EDDY-CURRENT THICKNESS AND ROLLING SPEED METER OF NONFERRO- MAGNETIC CONDUCTING BAND	101
KYUREGHYAN S.G., MAMIKONYAN B.M., SHMELEV V.K., ABGARYAN S.V., BALASSANYAN S.Sh.	
ON FLOTATION PROCESS CONTROL PROBLEM FOR MOLYBDENUM ORE DRESSING	107
BAGHDASARYAN V.V., HARUTYUNYAN V.V.	
DYNAMIC MODEL OF DECISION MAKING FOR THE MONITORING AND MANAGEMENT OF MIGRATION FLOWS	114
SAHAKYAN H.G.	
ON THE METHOD OF DYNAMIC MULTIPLE CRITERIA OPTIMAL DECISION MAKING PROBLEM SOLUTION	120
HARUTYUNYAN H.H.	
PHOTOELECTRIC PROPERTIES OF SILICIDE-SILICON-SILICIDE STRUCTURES RESEARCH	126
KOCHARYAN S. K.	
COMPRESSION PROCESS MODELLING MADE TO STANDART MPEG-2	130
SHAGHGAMYAN A.S.	
NON-LINEAR DIGITAL-ANALOG TRANSDUCER	136
KHUDAVERDYAN S. Kh.	
SPECTRAL PHOTOCURRENT DISTRIBUTION FEATURES IN STRUCTURES BASED ON CdTe	142
HARUTYUNYAN H.H.	
PHOTOELECTRIC PROPERTIES OF SILICIDE-SILICON- SILICIDE STRUCTURES RESEARCH	149
BALAYAN H.L.	
TRANSMITTER - RECEIVER MODULE STRUCTURE SCHEME OF ACTIVE PHASED ANTENNA ARRAY	153
GHULGHAZARYAN D.K.	
THE PHASE LIGHT RANGE FINDER WITH HF MODULATION OF LASER EMISSION	157
AYVAZYAN R.S.	
COMPARATIVE EVALUATION OF EFFECTIVE DIESEL ENGINE INDICES	161