

ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԱԶԳԱՅԻՆ ԱԿԱԴԵՄԻԱՅԻ ԵՎ

ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԱԶԳԱՅԻՆ ՊՈԼԻՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆԻ

ՏԵԴԵԿԱԳԻՐ ИЗВЕСТИЯ

НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК АРМЕНИИ И

НАЦИОНАЛЬНОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
АРМЕНИИ

ՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՍԵՐԻԱ

СЕРИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК

ԵՐԵՎԱՆ

ЕРЕВАН

Журнал издается с 5.01.1948 г.
Выходит 4 раза в год

ԽՄԲԱԳՐԱԿԱՆ ԿՈԼԵԳԻԱ

Ռ.Մ. ՄԱՐՏԻՐՈՍՅԱՆ (գլխավոր խմբագիր), Հ.Ա. ԹԵՐԶՅԱՆ (գլխ. խմբ. տեղակալ),
Զ.Կ. ՍՏԵՓԱՆՅԱՆ (պատասխանատու քարտուղար), Ս.Գ. ԱԴԲԱԼՅԱՆ, Ռ.Վ. ԱՌՈՅԱՆ,
Վ.Վ. ԲՈՒՆԻԱՏՅԱՆ, Ա.Խ. ԳՐԻԳՈՐՅԱՆ, Ժ.Դ. ԴԱՎԻԴՅԱՆ, Ս.Պ. ԴԱՎԹՅԱՆ,
Ս.Ս. ՂԱԶԱՐՅԱՆ, Ռ.Զ. ՄԱՐՈՒԽՅԱՆ, ՅՈՒ.Լ. ՍԱՐԳՍՅԱՆ, Վ.Ս. ՍԱՐԳՍՅԱՆ,
Վ.Ս. ՍԱՖԱՐՅԱՆ, Ս.Հ. ՍԻՄՈՆՅԱՆ, Մ.Գ. ՍՏԱԿՅԱՆ, Ա.Թ. ՔՈՒՉՈՒԿՅԱՆ

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Р.М. МАРТИРОСЯН (главный редактор), А.А. ТЕРЗЯН (зам. глав. редактора),
З.К. СТЕПАНЯН (ответственный секретарь), С.Г. АГБАЛЯН, Р.В. АТОЯН,
В.В. БУНИАТЯН, А.Х. ГРИГОРЯН, Ж.Д. ДАВИДЯН, С.П. ДАВТЯН, С.М. КАЗАРЯН,
А.Т. КУЧУКЯН, В.З. МАРУХЯН, Ю.Л. САРКИСЯН, В.С. САРКИСЯН,
В.С. САФАРЯН, С.О. СИМОНЯН, М.Г. СТАКЯН

EDITORIAL BOARD

R.M. MARTIROSSYAN (editor-in-chief), H.A. TERZYAN (vice-editor-in-chief),
Z.K. STEPANYAN (executive secretary), S.G. AGHBALYAN,
R.V. ATOYAN, V.V. BUNIATYAN, Zh.D. DAVIDYAN,
S.P. DAVTYAN, S.M. GHAZARYAN, A.Kh. GRIGORYAN, A.T. KUCHUKYAN,
V.Z. MARUKHYAN, YU.L. SARGSYAN, V.S. SARKISSYAN, V.A. SAFARYAN,
S.H. SIMONYAN, M.G. STAKYAN

Հրատ. խմբագիր՝

Ժ.Ս. ՍԵՅՐԱՆՅԱՆ

Խմբագիրներ՝

Հ.Յ. ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ

Հ.Զ. ՂԱԶԱՐՅԱՆ

© Издательство ГИУА
Известия НАН и ГИУ Армении (сер. техн. наук), 2014

Ю.Л. САРКИСЯН, К.Г. СТЕПАНЯН, С.В. ВЕРЛИНСКИЙ

**АППРОКСИМАЦИОННЫЙ СИНТЕЗ РЕКОНФИГУРИРУЕМЫХ
ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ МАНИПУЛЯТОРОВ С ОГРАНИЧЕННОЙ
ПОДВИЖНОСТЬЮ ПО МИНИМАКСНОМУ КРИТЕРИЮ ТОЧНОСТИ**

Рассмотрены задачи аппроксимационного синтеза реконфигурируемых параллельных манипуляторов с ограниченным числом степеней свободы по минимаксному критерию точности реализации заданных последовательностей положений твердого тела. На основе методов линейного чебышевского приближения и нелинейного программирования разработаны простые алгоритмы численного решения сформулированных минимаксных задач.

Ключевые слова: реконфигурируемый манипулятор, параллельный манипулятор, аппроксимационный синтез, аппроксимационная задача, минимаксный критерий, регулируемая диада.

Введение. В последние годы значительно возрос интерес к манипуляторам с ограниченной подвижностью, которые успешно заменяют универсальные многоподвижные манипуляционные системы со сложными системами управления при автоматизации ряда производственных операций, требующих реализации всего нескольких периодически повторяющихся положений рабочего органа. К преимуществам таких устройств относятся малое число приводов и движущихся масс, простота управления и низкая себестоимость, высокая надежность и благоприятные динамические характеристики [1]. С точки зрения практических приложений, особенно перспективны реконфигурируемые манипуляционные механизмы с малым числом степеней свободы, которые простым регулированием некоторых геометрических параметров способны перенастраиваться в процессе работы на выполнение различных программ перемещений объекта манипулирования [2]. В работе [3] рассматриваются задачи аппроксимационного синтеза реконфигурируемых параллельных механизмов, построенных на базе диад с одним регулируемым параметром методом квадратического приближения. Для повышения точности воспроизведения заданных положений в настоящей статье предлагаются численные решения этих же задач по минимаксному критерию оценки погрешности приближения, которые разработаны с использованием теории и вычислительных методов линейного чебышевского приближения и нелинейного программирования.

Структурный синтез реконфигурируемых манипуляторов. В основе синтеза рассматриваемых манипуляционных механизмов лежит модифицированный

модульный принцип формирования их структурных схем [4], суть которого излагается ниже. Тело e , к которому закреплен рабочий орган манипулятора, перемещается через m упорядоченных множеств заданных положений относительно неподвижного тела E (основания манипулятора), каждое из которых состоит из N_j положений: $e_{ij} (j = 1, 2, \dots, m, i = 1, 2, \dots, N_j)$. Синтезируемые механизмы имеют параллельную структуру и состоят из определенного числа модулей в виде регулируемых двузвенных цепей – диад, соединяющих выходное звено e манипулятора с основанием E (см. рис.), причем их срединные пары в рабочем режиме манипулятора зафиксированы и функционируют лишь в процессе перенастройки механизма на новое множество рабочих положений выходного звена, регулируя расстояние между осями или центрами концевых кинематических пар диады. Допускаем, что срединная регулирующая пара C двузвенных модулей является поступательной или вращательной. Тогда центр или ось концевой кинематической пары каждого двузвенного модуля генерирует некоторое однопараметрическое семейство F_j кривых или поверхностей, соответствующих последовательности значений угловой или линейной координаты регулирующей пары C . Теперь на теле l , перемещающемся через заданные m множества положений, отыскиваем такие точки B и прямые α , которые в заданных положениях e_{ij} аппроксимируют с достаточной точностью кривые или поверхности однопараметрических семейств $F_{kj} (k = 1, 2, \dots, K, j = 1, 2, \dots, m)$, число K которых равно числу выбранных структурных разновидностей двузвенных модулей синтезируемого манипулятора (рис.). Далее вводим связи, принуждающие найденные характеристические точки или линии тела e оставаться на соответствующем семействе кривых или поверхностей F_{kj} . Эти связи можно реализовать посредством регулируемых диад типа СПС, ПлПс, ВВВ, ВПС, ППС, ПВС, соединяющих тело e с основанием E . На рисунке представлены двузвенные регулируемые цепи типа СПС и ВВЦ. Для упрощения записи на рисунке и в дальнейшем изложении пропущен индекс k , поскольку далее речь идет лишь о синтезе отдельных модулей.

Сочетаниями структурно различных двузвенных модулей можно образовать множество вариантов реконфигурируемого манипулятора с заданным числом степеней свободы, отличающихся по точности реализации заданных положений и другим функциональным характеристикам. Для синтеза реконфигурируемых манипуляторов, которые в рабочем режиме, т.е. при фиксации регулирующих пар, действуют как одноподвижные (одноприводные) системы, требуется накладывать пять связей на движение e . Например, для синтеза одноподвижного симметрического параллельного манипулятора с использованием только диад типа СПС необходимо синтезировать пять таких модулей. Особенностью и основным преимуществом предлагаемой методологии аппроксимационного кинематического синтеза является то, что отдельные модули манипулятора проектируются авто-

номно, а сложный вычислительный процесс синтеза системы разбивается на параллельно выполняемые процедуры синтеза отдельных модулей.

С другой стороны, реализация предлагаемой методологии требует решения специального класса задач аппроксимационной кинематической геометрии, связанных с чебышевским приближением множеств положений точек или линий посредством ранее неизученных геометрических образов, описывающих связи регулируемых диад, таких как однопараметрические семейства концентрических окружностей, соосных цилиндров и конусов, линейных конгруэнций, параллельных плоскостей и т.д. Ниже приводятся обобщенная постановка этих аппроксимационных задач и унифицированные итерационные алгоритмы вычисления их решений.

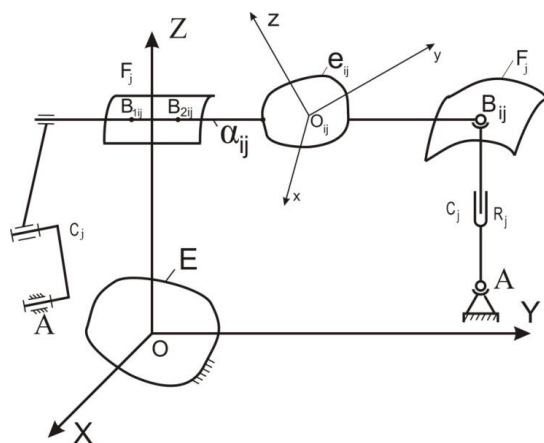


Рис. Модульный принцип структуры синтеза реконфигурируемых манипуляторов

Постановка аппроксимационной задачи синтеза диад по минимаксному критерию. Пусть задано m наборов конечноудалённых положений тела e относительно E , N_j положений в каждом наборе. В системе координат $OXYZ$, связанной с телом E , задано также однопараметрическое семейство m кривых или поверхностей F_{ij} ($i = 1, 2, \dots, m$) (рис.). Требуется определить в системе координат $oxzy$, связанной с телом e , такую точку B или прямую α , множество положений B_{ij} или α_{ij} ($j=1, 2, \dots, m, i=1, 2, \dots, N_j$) которых в смысле чебышевского приближения наилучшим образом аппроксимируют кривые или поверхности семейства F_j .

Искомые характеристические точки B тела e определяются по условию минимакса отклонения множества положений B_{ij} ($j = 1, 2, \dots, m, i = 1, 2, \dots, N_j$) точки B от семейства F_j . Для оценки отклонения сначала выразим координаты точки B в системе $OXYZ$ с помощью матричного уравнения

$$(X_{Bij}Y_{Bij}Z_{Bij})^t = T_{ij}(x_B y_B z_B)^t + (X_{Oij}Y_{Oij}Z_{Oij})^t, \quad (1)$$

где T_{ij} – ортогональная (3×3) матрица вращения, составленная из заданных направляющих косинусов между осями систем OXYZ и $oxyz$; $(X_{Oij}Y_{Oij}Z_{Oij})^t$ – столбцовая матрица, составленная из заданных координат начала системы $oxyz$ в системе OXYZ в положениях e_{ij} тела e .

Уравнения кривых и поверхностей семейства F_j представим в неявном виде

$$F_j(X, Y, Z, a, b_j) = 0, j = 1, 2, \dots, m, \quad (2)$$

где $a = (a_1, a_2, \dots, a_k)$ – вектор постоянных параметров аппроксимирующих кривых или поверхностей; b_j – значения переменного параметра семейства, определяющего j -ю кривую или поверхность семейства F_j .

Подставив координаты X_{Bij} , Y_{Bij} , Z_{Bij} точки B из (1) в левые части уравнения (2), получим систему функций так называемых алгебраических отклонений:

$$\Delta q_{ij} = F_i(X_{Bij}, Y_{Bij}, Z_{Bij}, a, b_i), \quad (3)$$

коррелирующих с определенной точностью с минимизируемыми геометрическими ортогональными отклонениями точек B_{ij} от соответствующих семейств F_j . Нетрудно заметить, что Δq_{ij} являются функциями как искомых координат x_B , y_B , z_B точки B , так и параметров a и b_j аппроксимирующих кривых и поверхностей семейства F_j . В качестве меры отклонения множества точек B_{ij} от семейства F_j воспользуемся чебышевской нормой

$$S(P) = \max_{j \in [1; m]} \max_{i \in [1; NN_j]} |\Delta q_{ij}(P)|, \quad (4)$$

где $P = (P_1, P_2, \dots, P_n)$ – вектор совокупности указанных выше параметров x_B , y_B , z_B , a и b_j . Тогда рассматриваемая аппроксимационная задача сводится к определению такого вектора P^* , для которого имеет место условие

$$S(P^*) = \min_{\{P\}} S(P) = \min_{\{P\}} \max_{j \in [1; m]} \max_{i \in [1; Nj]} |\Delta q_{ij}(P)|. \quad (5)$$

В случае поиска прямой α тела e задача формулируется аналогичным образом. Здесь семействами аппроксимирующих поверхностей F_j являются системы соосных линейчатых поверхностей (круговых цилиндров, конусов, однополостных гиперболоидов, линейчатых конгруэнций), которые в системе координат OXYZ представлены в виде семейств прямых

$$\frac{x - x_{ij}}{l_{ij}} = \frac{y - y_{ij}}{m_{ij}} = \frac{z - z_{ij}}{n_{ij}}, \quad (6)$$

где $x_{ij}(P)$, $y_{ij}(P)$, $z_{ij}(P)$, $l_{ij}(P)$, $m_{ij}(P)$ и $n_{ij}(P)$ – известные функции вектора $P = (P_1, P_2, \dots, P_n)$ постоянных параметров, определяющих прямые (6) в системе OXYZ.

Для оценки отклонения α_{ij} -го положения прямой α тела e от соответствующей прямой семейства (6) прямую α представляем в виде двух несовпадающих точек

$B_1(x_{B_1}, y_{B_1}, z_{B_1})$ и $B_2(x_{B_2}, y_{B_2}, z_{B_2})$. По формуле (1) определяем координаты точек B_1 и B_2 в системе OXYZ. Подставив эти координаты в уравнения (6), получим неувязки

$$\begin{aligned}\Delta q_{ij1} &= (X_{B1ij} - X_{ij})l_{ij}^{-1} - (Y_{B1ij} - Y_{ij})m_{ij}^{-1}, \\ \Delta q_{ij2} &= (X_{B1ij} - X_{ij})l_{ij}^{-1} - (Z_{B1ij} - Z_{ij})n_{ij}^{-1}, \\ \Delta q_{ij3} &= (X_{B2ij} - X_{ij})l_{ij}^{-1} - (Y_{B2ij} - Y_{ij})m_{ij}^{-1}, \\ \Delta q_{ij4} &= (X_{B2ij} - X_{ij})l_{ij}^{-1} - (Z_{B2ij} - Z_{ij})n_{ij}^{-1}\end{aligned}\quad (7)$$

положений точек B_1 и B_2 от семейства прямых (6). В этом случае Δq_{ijk} становятся функциями как искомых координат $x_{B_1}, y_{B_1}, z_{B_1}, x_{B_2}, y_{B_2}, z_{B_2}$ точек B_1 и B_2 , так и параметров a и b_j прямых (6). В качестве меры отклонения множества положений прямой A тела e от соответствующих прямых семейства (6) вновь используем чебышевскую норму

$$S(P) = \max_{k \in [1; 4]} \max_{j \in [1; m]} \max_{i \in [1; N_j]} |\Delta q_{ijk}(P)|, \quad (8)$$

где $P = (P_1, P_2, \dots, P_n)$ – вектор совокупности указанных выше параметров $x_{B_1}, y_{B_1}, z_{B_1}, x_{B_2}, y_{B_2}, z_{B_2}, a$ и b_j . Тогда рассматриваемая аппроксимационная задача сводится к определению такого вектора P^* , для которого имеет место

$$S(P^*) = \min_{\{P\}} S(P) = \min_{\{P\}} \max_{k \in [1; 4]} \max_{j \in [1; m]} \max_{i \in [1; N_j]} |\Delta q_{ijk}(P)|. \quad (9)$$

Алгоритмы решения сформулированных минимаксных задач. Сформулированные выше задачи аппроксимационной кинематической геометрии в общем случае относятся к нелинейным минимаксным задачам, решение которых связано с определёнными трудностями вычислительного характера. Для устранения этих трудностей предлагаются два упрощённых алгоритма численного решения рассматриваемых задач.

Алгоритм 1. Сначала вводим линейные представления функции отклонений $\Delta q_{ij}(P)$ ($j=1, 2, \dots, m, i=1, 2, \dots, N_j$)

$$\bar{\Delta q}_{ij}^{(\lambda)} = \sum_{l=1}^n \frac{\partial \Delta q_{ij}}{\partial P_l} \lambda_l + \Delta q_{ij}(P^\circ); \quad j = 1, 2, \dots, m; \quad i = 1, 2, \dots, N_j \quad (10)$$

вокруг точки $P^\circ = (P_1^\circ, P_2^\circ, \dots, P_n^\circ)$, где через $\partial \Delta q_{ij} / \partial P_l$ обозначены значения частных производных Δq_{ij} в точке P° . Далее решение задачи производится по описанному в [5] алгоритму.

1. Задаваясь начальными значениями искомых параметров $P^\circ = (P_1^\circ, P_2^\circ, \dots, P_n^\circ)$, формируем линейные представления (10).

2. Методом линейного чебышевского приближения [6] решаем минимаксную задачу

$$\bar{\Delta}q_{ij}(\lambda^*) = \min_{\{\lambda\}} \max_{j \in [1; m]} \max_{i \in [1; N_j]} \bar{\Delta}q_{ij}(\lambda),$$

откуда определяем значения $\lambda_l^* (l=1, 2, \dots, l)$ вспомогательных параметров λ_l .

3. Составляем выражения

$$P_l' = P_l^\circ + \lambda_l^*, l = 1, 2, \dots, l.$$

4. Далее точку P° заменяем точкой $P' = (P_1', P_2', \dots, P_n')$ и переходим к п.1 настоящего алгоритма.

Предложенный процесс прекращается при выполнении условия $||\lambda^*|| \leq \varepsilon$, где ε – заданная точность вычислений.

Алгоритм 2. В некоторых случаях, когда на искомые параметры $P_l (l=1, 2, \dots, n)$ наложены ограничения в виде неравенств

$$g_\mu(P) \leq 0, \mu = 1, 2, \dots, M_1, \quad (11)$$

решения рассматриваемых задач удобнее свести к задаче нелинейного программирования. С этой целью функционал качества (4) или (9) заменяем функцией

$$S(P, \alpha) = d \quad (12)$$

и определяем минимум этой функции с учетом ограничений

$$\Delta q_{ij}(P) - d \leq 0,$$

$$\Delta q_{ij}(P) + d \geq 0; j = 1, 2, \dots, m, i = 1, 2, \dots, N_j, \quad (13)$$

$$g_\mu(P) \leq 0; \mu = 1, 2, \dots, M_1.$$

Нетрудно заметить, что решение этой задачи нелинейного программирования приводит к решению рассмотренных уже минимаксных задач.

Синтез регулируемой диады СПС. В качестве примера приведем синтез регулируемой диады СПС, где семейство аппроксимирующих поверхностей – множество концентрических сферических поверхностей (рис.). Здесь алгебраические отклонения (3) положений B_{ij} точки B от соответствующей сферической поверхности семейства F_j принимают вид

$$\Delta q_{ij} = (X_{Bij} - X_A)^2 + (Y_{Bij} - Y_A)^2 + (Z_{Bij} - Z_A)^2 - R_i^2, \quad (14)$$

$$j = 1, 2, \dots, m, i = 1, 2, \dots, N_j.$$

Координаты $X_{Bij}, Y_{Bij}, Z_{Bij}$ точки B определяются по (1):

$$X_{Bij} = a_{11ij}x_B + a_{12ij}y_B + a_{13ij}z_B + X_{0ij},$$

$$Y_{Bij} = a_{21ij}x_B + a_{22ij}y_B + a_{23ij}z_B + Y_{0ij},$$

$$Z_{Bij} = a_{31ij}x_B + a_{32ij}y_B + a_{33ij}z_B + Z_{0ij},$$

где

$$\begin{aligned}
a_{11ij} &= \cos\psi_{ij}\cos\varphi_{ij} - \sin\psi_{ij}\cos\theta_{ij}\sin\varphi_{ij}, \\
a_{12ij} &= -\cos\psi_{ij}\sin\varphi_{ij} - \sin\psi_{ij}\cos\theta_{ij}\cos\varphi_{ij}, a_{13ij} = \sin\psi_{ij}\sin\theta_{ij}, \\
a_{21ij} &= \sin\psi_{ij}\cos\varphi_{ij} + \cos\psi_{ij}\cos\theta_{ij}\sin\varphi_{ij}, \\
a_{22ij} &= -\sin\psi_{ij}\sin\varphi_{ij} + \cos\psi_{ij}\cos\theta_{ij}\cos\varphi_{ij}, \\
a_{23ij} &= -\cos\psi_{ij}\sin\theta_{ij}, a_{31ij} = \sin\theta_{ij}\sin\varphi_{ij}, a_{32ij} = \sin\theta_{ij}\cos\varphi_{ij}, a_{33ij} = \cos\theta_{ij}.
\end{aligned} \tag{15}$$

В (15) $X_{0ij}, Y_{0ij}, Z_{0ij}$ – заданные координаты начала системы $oxyz$ в системе $OXYZ$, а $\varphi_{ij}, \psi_{ij}, \theta_{ij}$ – заданные эйлеровы углы, определяющие ориентацию тела e .

В данном случае искомыми параметрами задачи (5) являются значения регулируемого радиуса R_j ($i=1,2,\dots,m$), координаты x_B, y_B, z_B точки B и координаты X_A, Y_A, Z_A центра A концентрических сфер. Совокупность этих параметров обозначим вектором $P = (P_1, P_2, \dots, P_n)$, где $P_1 = x_B, P_2 = y_B, P_3 = z_B, P_4 = X_A, P_5 = Y_A, P_6 = Z_A, P_7 = R_1, P_8 = R_2, \dots, P_{m+6} = R_m$.

В качестве численного примера приведём синтез реконфигурируемого манипуляционного механизма 5 (СПС), воспроизводящего два набора заданных положений тела e , по 6 положений в каждом (табл. 1).

Таблица 1

Значения обобщенных координат заданных положений тела e

	j	X_{0ij}	Y_{0ij}	Z_{0ij}	ψ_{ij}	θ_{ij}	φ_{ij}
1	1	2,416	6,729	6,748	88,35	132,76	223,57
	2	1,523	5,934	6,492	110,95	141,87	220,58
	3	1,073	5,225	6,282	121,54	136,36	220,49
	4	0,447	4,018	5,779	130,23	111,07	221,90
	5	0,555	4,005	5,866	129,56	87,58	228,41
	6	0,965	5,096	6,159	116,71	68,29	239,02
2	7	0,576	7,886	6,249	143,04	161,90	257,25
	8	0,884	8,379	6,129	192,89	168,43	298,85
	9	1,297	8,961	6,112	233,39	166,92	330,14
	10	0,810	8,363	6,220	210,17	164,91	292,33
	11	-0,226	6,357	6,136	183,57	146,10	254,47
	12	-0,739	4,848	5,849	171,75	121,19	246,78

В табл. 2 приведены координаты центров 5 сферических шарниров B и A пяти ног (модулей) манипулятора соответственно в e и E , значения R_{1k} и R_{2k} ($k=1,2,\dots,5$) регулируемых параметров, а также значения $\max \Delta_{ij}$ нормального отклонения от сферы.

Таблица 2

Искомые параметры механизма 5 (СПС)

	1	2	3	4	5
X_{Aj}	4,7600	3,9014	2,5617	3,6724	6,3824
Y_{Aj}	5,2721	6,2407	5,3176	5,1787	1,7222
Z_{Aj}	0,1636	-0,5755	3,4492	4,9249	6,8671
x_{Bj}	0,0818	0,1097	0,1586	1,1989	-0,0699
y_{Bj}	-0,0215	-0,1010	0,8682	0,5521	-0,0217
z_{Bj}	0,0085	-0,0275	0,2105	-0,1492	0,0567
R_{1j}	7,1427	7,5243	5,4358	6,0105	6,3694
R_{2j}	7,7970	7,5870	15,1384	8,8371	10,0040
$\max \Delta_{ij}$	0,0090	0,0170	0,0190	0,0110	0,0060

Результаты вычислений показали, что применение минимаксного метода приближения позволило улучшить точность приближения в среднем на 44% по сравнению с точностью, полученной при решении этой же задачи методом квадратического приближения в [3].

Заключение. На базе принципа минимакса разработаны численные методы синтеза многофункциональных одноподвижных манипуляторов с возможностью их перенастройки на реализацию двух и более последовательностей заданных положений выходного звена. Рассматриваемые механизмы имеют модульную структуру и образуются соединением выходного звена и стойки посредством диад со срединной управляющей парой, функционирующей в процессе перенастройки. Синтез каждой из составляющих диад проектируемого манипулятора сводится к определению таких точек или линий объекта манипулирования, которые при его прохождении через заданные последовательности положений в смысле чебышевской нормы наименее отклоняются от систем кривых или поверхностей, генерируемых концевыми элементами диады при различных значениях переменного регулируемого параметра управляющей пары. Предлагаемые методы иллюстрируются численным примером синтеза манипулятора типа 5 (СПС) с поступательными парами, регулирующими длины ног манипулятора при его перенастройке на воспроизведение новой последовательности заданных положений и фиксируемыми в процессе их реализации.

Работа выполнена в рамках научной темы 13-2D181, финансируемой Государственным комитетом по науке Министерства образования и науки РА.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lower – Mobility Parallel Robots: Theory and Applications. Advances in Mechanical Engineering.– Hindawi Publishing Co., 2010.- 80 p.
2. **Sarkissyan Y.L., Kharatyan A.G., Eghishyan K.M., Parikyan T.F.** Synthesis of Mechanisms with Variable Structure and Geometry for Reconfigurable Manipulation

Systems // Proc. Of ASME/IFToMM Int. Conf. on Reconfigurable Mechanisms and Robots, Re Mar.– London, UK, 2009. – P.195-199.

3. **Саркисян Ю.Л., Харатян А.Г., Парикян Т.Ф.** Аппроксимационный синтез реконфигурируемых манипуляционных механизмов с регулируемыми диадами // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН.- 2009. – Т.62, №3.- С. 251-261.
4. **Саркисян Ю.Л.** Аппроксимационный синтез механизмов. – М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1982.- 304 с.
5. **Саркисян Ю.Л., Джавахян Р.П., Степанян К.Г., Шахпаронян С.Ш.** К теории нелинейных минимаксных задач синтеза механизмов // Машиноведение.– 1983. – №1.– С. 52-60.
6. **Stifel E.** Ober diskrete and lineare Tschebyscheff-Approximation Numerische Mathematik.- 1959.- P. 1-28.

ГИУА (Политехник). Материал поступил в редакцию 12.05.2014.

ՅՈՒ. Լ. ՍԱՐԳՍՅԱՆ, Կ.Գ. ՍՏԵՓԱՆՅԱՆ, Ս.Վ. ՎԵՐԼԻՆՍԿԻ

**ՄԱՀՄԱՆԱՓԱԿ ՇԱՐԺՈՒՆՈՒԹՅԱՄԲ ՎԵՐԱԿՈՆՖԻԳՈՒՐԱՑՎՈՂ ԶՈՒԳԱՀԵՌ
ՄԱՆԻՊՈՒԼԱՏՈՐՆԵՐԻ ԱՐՈՂՔՄԻՄԱՑԻՈՆ ՄԻՆԹԵԶ ԸՍՏ ՃՇԳՐՏՈՒԹՅԱՆ
ՄԻՆԻՄԱԶՄԱՑԻՆ ԶԱՓԱՆԻՇԻ**

Դիտարկվում են սահմանափակ շարժունությամբ վերականգնվող զուգահեռ մանիպուլյատորների ապրոքսիմացիոն սինթեզի խնդիրներ՝ ըստ պինդ մարմնի դիրքերի տված հաջորդականությունների վերարտադրության ճշտության մինիմաքսային չափանիշի: Մշակված են ձևակերպված մինիմաքսային խնդիրների թվային լուծման պարզ ալգորիթմներ՝ գծային չեբիշևյան մոտարկումների և ոչ գծային ծրագրավորման հաշվողական մեթոդներով:

Առանցքային բառեր. վերականգնվող մանիպուլյատոր, զուգահեռ մանիպուլյատոր, ապրոքսիմացիոն սինթեզ, ապրոքսիմացիոն խնդիր, մինիմաքսային չափանիշ, կարգավորվող դիադա:

Y.L. SARKISSYAN, K.G. STEPANYAN, S.V. VERLINSKI

**APPROXIMATE SYNTHESIS OF LIMITED MOBILITY RECONFIGURABLE
PARALLEL MANIPULATORS WITH A MINIMAX ACCURACY CRITERION**

Approximate synthesis problems for the reconfigurable parallel manipulators with limited degrees of freedom are considered based on the minimax accuracy criterion for generating rigid body ordered position sets. Simple computational algorithms of numerical solution for the formulated minimax problems are developed by using the methods of linear chebyshev approximations and non-linear programming procedures.

Keywords: reconfigurable manipulator, parallel manipulator, approximate synthesis, approximation problem, minimax criterion, adjustable dyad.

Ս.Գ. ԱՂԲԱԼՅԱՆ, Տ.Ն. ՍԱՖԱՐՅԱՆ, Ա.Վ. ԱՆԴՐԻԱՍՅԱՆ, Վ.Գ. ՎԱՐԴԱՆՅԱՆ

**ԱԼՅՈՒՄԻՆԱՅԻՆ ՀՐԱՄՈՒՐ ՓՈՇԵՀԱՄԱՁՈՒԼՎԱԾՔՆԵՐԻ
ԿԱՌՈՒՑՎԱԾՔԱԳՈՅԱՑՄԱՆ ԳՈՐԾԸՆԹԱՅԻ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԸ ԵՎ
ՄԵՏԱՂԱԳՐԱԿԱՆ ՎԵՐԼՈՒԾՈՒԹՅՈՒՆԸ**

Համալիր հետազոտությունների արդյունքում բացահայտվել է, որ $2,5\%Cu+1,8\%Mg+1,2\%Ni+1,2\%Fe+Al_{100}$ բաղադրությամբ ալյումինային հրամուր փոշեհամաձուլվածքի կառուցվածքը միումից և ծերացումից հետո հետերոգեն է՝ բաղկացած ալյումինի հիմքով պինդ լուծույթից և $CuAl_2$, Al_2CuMg , Al_3FeNi , Al_7Cu_2Fe , Al_6CuNi ինտերմետաղական ֆազերից, որոնք անջատվում են ալյումինի հիմքով գերհազեցած պինդ լուծույթից ծերացման ժամանակ՝ ապահովելով բարձր մեխանիկական հատկություններ մինչև $300...350\text{ }^{\circ}C$ ջերմաստիճանային միջակայքում:

Առանցքային բառեր. ալյումինի փոշի, մետաղափոշիներ, մամլում, տաք արտամղում, թրծում, մխում, ծերացում, պինդ լուծույթ, ինտերմետաղական ֆազ, կարծրություն, ամրություն, հրամրություն:

Ժամանակակից տեխնիկայի գրեթե բոլոր բնագավառներում անընդհատ աճում է հետաքրքրությունն ալյումինային համաձուլվածքների կիրառման նկատմամբ, ինչը պայմանավորված է տվյալ համաձուլվածքի լավագույն համալիր հատկություններով: Ալյումինի արտադրությունը և պահանջարկն անընդհատ աճում է՝ էականորեն գերազանցելով պողպատի, պղնձի, անագի, ցինկի արտադրության աճը:

Արդյունաբերական համաձուլվածքները, որոնք մշակվել են $Al-Cu-Mg$, $Al-Mg-Si$, $Al-Cu-Mg-Si$, $Al-Zn-Mg-Cu$, $Al-Zn-Mg$, $Al-Mg-Li$, $Al-Cu-Li$, $Al-Cu-Mg-Ag$ համակարգերի հիման վրա, ունեն բարձր համալիր հատկություններ ամրացնող ջերմային մշակումից հետո (մխում և ծերացում): Այս համաձուլվածքների մայրակը ներկայացնում է ալյումինի հիմքով պինդ լուծույթ՝ ամրացված ինտերմետաղական դիսպերս ֆազերով, որոնք անջատվում են պինդ լուծույթից ծերացման ժամանակ: Նշվածը վերաբերում է ալյումինի հիմքով բոլոր համակարգերի համաձուլվածքներին, այսինքն՝ ամրացման մեխանիզմն ալյումինային բոլոր համաձուլվածքների համար նույնն է, որը ներկայացնում է գերհազեցած պինդ լուծույթի ստացում և դիսպերս կարծրացում, ընդ որում, կարծրացման մեջ առավել մեծ արժեք է ստանում դիսպերս ամրացման գործընթացը:

Դիսպերս կարծրացման բնագավառում կատարված հետազոտական լայն աշխատանքներով է բնութագրվում ալյումինային կոնստրուկցիոն համաձուլվածքների ժամանակակից զագացման մակարդակը: Ալյումինային համաձուլվածքների կատարելագործման բնագավառում հետագա ուսումնասիրությունները, որոնք պետք է

նպատակաուղղված լինեն նոր կոմպոնենտներով լեգիրման և ալյումինի հիմքով բարձր լուծելիությամբ գերհազեցած պինդ լուծույթների ստացմանը, անկասկած, պետք է շարունակվեն և կարող են տալ ցանկալի արդյունք:

Ամրության, հրամրության, կոռոզիակայունության և մի շարք այլ շահագործման և տեխնոլոգիական բնութագրերի հետագա բարձրացման առավել հեռանկարային ուղին ալյումինային համաձուլվածքի լեգիրումն է այնպիսի մետաղներով, որոնք քիչ կամ զրեթե չեն լուծվում պինդ ալյումինում, սակայն ալյումինի հետ առաջացնում են տարբեր ինտերմետաղական միացություններ: Դրանցից են, առաջին հերթին, անցումային և մի շարք հազվագյուտ հողալկալիական մետաղները: Աղ. 1-ում բերված են ինտերմետաղական ֆազերի բաղադրությունը և միկրոկարծրությունը, որոնք առաջանում են ալյումինային համաձուլվածքում մի շարք անցումային և հազվագյուտ մետաղներով լեգիրման ժամանակ [1, 2]:

Աղյուսակ 1

Անցումային և հազվագյուտ հողալկալիական մետաղների առավելագույն լուծելիությունը պինդ ալյումինում և համաձուլվածքներում առաջացող ինտերմետաղական ֆազերի միկրոկարծրությունը

Համակարգ	Կոմպոնենտների առավելագույն լուծելիությունը պինդ ալյումինում	Ինտերմետաղական ֆազեր	Միկրոկարծրություն Hv, ՄՊա
Al-Mn	1,8 Mn	Al ₆ Mn	5400...5600
Al-Cr	0,9 Cr	Al ₇ Cr	5000...7000
Al-Ti	0,26 Ti	Al ₃ Ti	6000...7000
Al-Zr	0,28 Zr	Al ₃ Zr	4200...7400
Al-Co	0,02 Co	Al ₉ Co ₂	6500...7500
Al-Ni	0,04 Ni	Al ₃ Ni	7000...7700
Al-Fe	0,05 Fe	Al ₃ Fe	8000...11000
Al-Fe-Si	0,05 Fe	α (Al-Fe-Si)	11000

Ինչպես երևում է աղ. 1-ից, ինտերմետաղական ֆազերի կարծրությունը, որոնք առաջանում են ալյումինային համաձուլվածքում՝ դժվար լուծվող անցումային մետաղների հետ, որպես կանոն, արդյունաբերական համաձուլվածքների հիմնական ամրացնող ֆազերի կարծրությունից բարձր է, և դրանք կարող են դառնալ ալյումինի ու նրա համաձուլվածքի արդյունավետ ամրացնողներ [3, 4]:

Քիչ լուծվող անցումային և հազվագյուտ հողալկալիական մետաղներով ալյումինային համաձուլվածքների լեգիրման մեթոդների հետազոտումը, որոնք ապահովում են դիսպերս ինտերմետաղական ֆազերի ստացումը (անցումային ալյումինոիդներ և հազվագյուտ հողալկալիական մետաղներ), բացահայտում է նոր հեռանկարներ ալյումինային համաձուլվածքի ստեղծման համար՝ էապես լավարկված հատկությունների մեծացումով: Այս հետազոտությունների արդյունքում, մասնավորապես [5-8]

աշխատանքներում, կատարվել է ընդհանուր եզրակացություն այն մասին, որ անցումային մետաղների ավելացման օգտակար ազդեցությունն այլումինային համաձուլվածքի հատկությունների վրա կապված է այլումինիդի անցումային մետաղների դիսպերս մասնիկների հետ, որոնք անջատվում են գերհազեցած պինդ լուծույթներից: Անցումային մետաղներով գերհազեցած պինդ լուծույթի առաջացման պայմանները և նրանց ազդեցությունը համաձուլվածքի հատկությունների վրա հետազոտվել են 20-րդ դարի 50-ական թվականներից սկսած, սակայն բոլոր հետազոտությունները վերաբերում են ձուլման եղանակով ստացված համաձուլվածքներին: Ինչ վերաբերում է այլումինային փոշեհամաձուլվածքներին, ապա դա նոր ուղղություն է, որը հետազոտման խիստ կարիք ունի:

Այլումինային հրամուր համաձուլվածքների ամրացնող ֆազերն են՝ CuAl_2 , Al_2CuMg , Al_3FeNi , $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$ և Al_6CuNi : Միումից և ծերացումից հետո պինդ լուծույթի մասնակի տրոհման դեպքում այս ֆազերն առանձնանում են դիսպերս մասնիկների ձևով, որոնք էապես բարձրացնում են համաձուլվածքի հրամրությունը: Մ20 մակնիշի համաձուլվածքի բարձր հրամրությունն ապահովվում է շնորհիվ պղնձի, մանգանի և տիտանի բարձր պարունակության, իսկ AK4-1-ինը՝ նիկելի և պղնձի պարունակության, ինչն արգելակում է դիֆուզիոն գործընթացները և առաջացնում դժվար լուծվող մանրահատ ամրացնող ֆազեր, որոնք կայուն են տաքացման ժամանակ կոագուլացման նկատմամբ:

Հրամրության բարձրացման առավել հեռանկարային և մինչ այժմ քիչ հետազոտված եղանակ է եռակալված այլումինային փոշիներից եռակալված այլումինային համաձուլվածքի ստացումը [2]: Դրա համար օգտագործում են այլումինային փոշին, որը պատված է Al_2O_3 օքսիդային թաղանթով, լցնում են մամլաձևերը և մամլում ճնշման տակ, ապա կատարում եռակալում 600°C –ում: Քանի որ այլումինի օքսիդը չի լուծվում այլումինային հիմքում և չի կոագուլացվում, այդ իսկ պատճառով այս համաձուլվածքներն ունեն լավ հրամրություն, ամրություն, բարձր կոռոզիակայունություն, լավ ջերմա- և էլեկտրահաղորդականություն, բարձր մաշակայունություն:

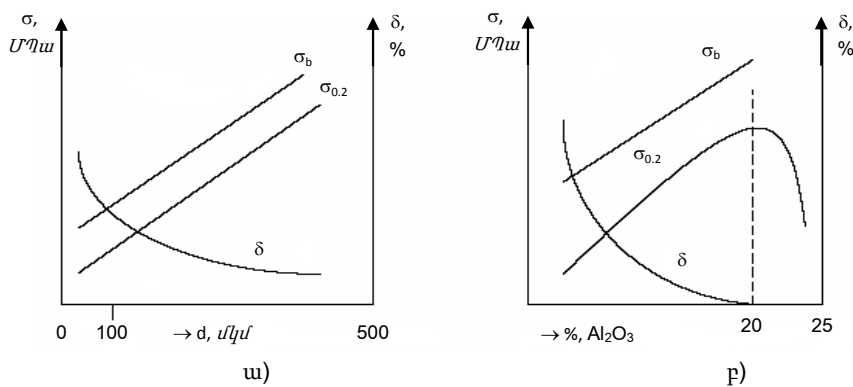
ԵԱՓՀ-1, ԵԱՓՀ-2, ԵԱՓՀ-3, ԵԱՓՀ-4 մակնիշների համաձուլվածքները պարունակում են համապատասխանաբար 6-8, 9-12, 13-17, 18-22 % Al_2O_3 : ԵԱՓՀ-ից պատրաստված արտադրատեսակների հատկությունները հիմնականում կախված են այլումինի օքսիդի պարունակությունից (աղ. 2) և այլումինային փոշու դիսպերսության աստիճանից (նկ. 1) [9]:

Աղ. 2-ում բերված են ԵԱՓՀ-ից պատրաստված լարերի և ժապավենների քիմիական բաղադրությունը և մեխանիկական հատկությունները:

ԵԱՓՀ-ի քիմիական բաղադրությունը և մեխանիկական հատկությունները

Մակ- նիշը	Փորձարկ- ման ջերմաս- տիճանը	Քիմիական բաղադրությունը, %				Մեխանիկական հատկությունները			
		Al	Al ₂ O ₃	Fe	յուղ	σ_d , ՄՊա	$\sigma_{0.2}$, ՄՊա	δ , %	HB, ՄՊա
ԵԱՓՀ-1	20 300 500	հիմքը	6...9	0,2	0,2	260...300 160...180 50...70	200...240 120...140 50...60	8...1 2 3...7 2...6	850
ԵԱՓՀ-2	20 300 500	հիմքը	9...13	0,2	0,25	320...360 170...180 80...90	210...250 150...160 80...90	6...8 4...6 2...3	1000
ԵԱՓՀ-3	20 300	հիմքը	13...18	0,25	0,25	380...450 190...210	320...360 140...160	3...6 4...7	1200

ԵԱՓՀ-ի բարձր ամրությունը բացատրվում է ամրացնող ֆազերի բարձր դիսպերսությամբ և նրանց միջև փոքր հեռավորությամբ: ԵԱՓՀ-ն հրամրությամբ գերազանցում է բոլոր ալյումինային համաձուլվածքներին և լավ մշակվում է տաք արտամղմամբ: Դրանից արտադրում են թիթեղներ, փայլաթիթեղ, խողովակներ, տարբեր պրոֆիլներ, լարեր, դրոշմիչ նախապատրաստվածքներ: ԵԱՓՀ-ը կիրառում են ինքնաթիռաշինությունում, քիմիական և նավթաքիմիական արդյունաբերությունում, էլեկտրատեխնիկայում, 300...500 °C ջերմաստիճաններում [10]: Այս նյութերի խտությունը հավասար է ալյումինի խտությանը, ուստի չեն զիջում նրան կոռոզիակայունությամբ և անգամ կարող են փոխարինել Ti-ին և կոռոզիակայուն պողպատներին 250...500 °C ջերմաստիճանային տիրույթում աշխատելիս:



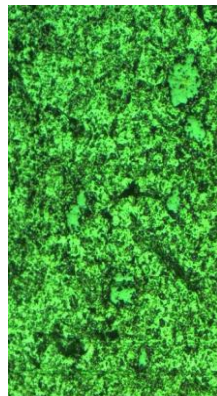
Նկ. 1. Ամրացնող ֆազերի դիսպերսության աստիճանի և Al₂O₃-ի քանակության ազդեցությունը ԵԱՓՀ-ի հատկությունների վրա. ա-ԵԱՓՀ-ի մեխանիկական հատկությունների կախվածությունը ամրացնող ֆազերի դիսպերսության աստիճանից, բ-ԵԱՓՀ-ի մեխանիկական հատկությունների կախվածությունը Al₂O₃ դիսպերսության աստիճանից

Ինչպես ցույց են տալիս փորձագիտական հետազոտությունները, ալյումինային հրամուր փոշեհամաձուլվածքները՝ համեմատած ձուլմամբ ստացված ալյումինային հրամուր համաձուլվածքների հետ, օժտված են բարձր ամրությամբ մինչև 300...500 °C ջերմաստիճաններում: Այս համաձուլվածքների կոռոզիակայունությունը համարժեք է մաքուր ալյումինին, իսկ երկաթով և նիկելով լեգիրման դեպքում (մինչև 1,2...1,5%) կարող են երկարաժամկետ աշխատել գոլորշիաօդային միջավայրում 350 °C-ի պայմաններում [11]:

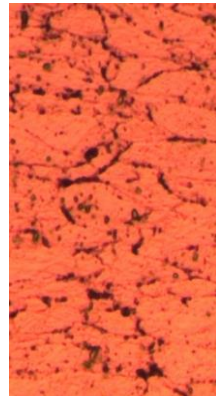
Ելնելով վերոհիշյալից՝ աշխատանքի նպատակն է բացահայտել ալյումինային հրամուր փոշեհամաձուլվածքների կառուցվածքագոյացման գործընթացի մեխանիզմը և կատարել մետաղագիտական հիմնավորում:

Հետազոտության համար ընտրվել է բաղադրիչների լավարկային բաղադրությունը՝ Cu=2,5%, Mg=1,8%, Ni=1,2%, Fe=1,2%, մնացածը՝ Al, որի դեպքում համաձուլվածքի մեխանիկական հատկությունները ստացվել են առավելագույնը՝ $\sigma_s=290...300$ ՄՊա, $\delta=10,5...11,5\%$, HB=100...105 ՄՊա [12]: Տեսական և փորձնական հետազոտություններով որոշվել են 2,5%Cu+1,8%Mg+1,2%Ni+1,2%Fe+Al_{մն} բաղադրությամբ բովախառնուրդի մամլման լավարկային ռեժիմները, որոնք ապահովում են մամլվածքի 20...25% նախնական ծակոտկենություն [13]:

Անձակոտկեն կառուցվածք ստանալու նպատակով եռակալումից հետո մամլվածքները ենթարկվել են տաք արտամղման տարբեր արտամղման գործակիցներով: Ինչպես ցույց է տրված նկ. 2-ում, տաք արտամղումից հետո կառուցվածքն անհավասարակշռված է, իսկ հատիկները՝ դեֆորմացված, ընդ որում, հատիկների դեֆորմացիայի աստիճանը կախված է արտամղման գործակիցից:



ա)



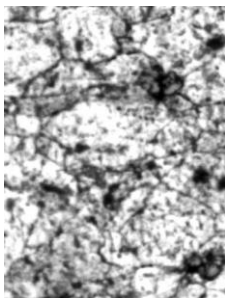
բ)



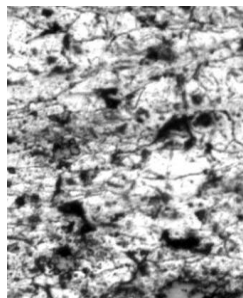
գ)

Նկ. 2. 2,5%Cu+1,8%Mg+1,2%Ni+1,2%Fe+Al_{մն} ալյումինային հրամուր փոշեհամաձուլվածքի միկրոկառուցվածքը տաք արտամղումից հետո ($\times 200$). $T_{\text{տ}}=525^{\circ}\text{C}$, $\tau_{\text{տ}}=30$ րոպե.
ա) $\lambda=3$, բ) $\lambda=4$, գ) $\lambda=5$

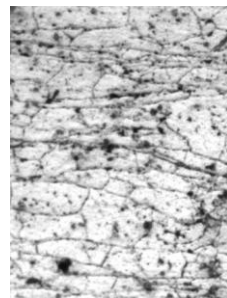
Ծակոտկենության հետազոտումը կատարվել է պիկնոմետրիկ մեթոդով: $\lambda=3$ արտամղման գործակցի դեպքում այն կազմել է 2...3%, $\lambda=4$ -ի դեպքում ստացվել է գործնականորեն անծակոտկեն կառուցվածք: 525 °C ջերմաստիճանում $\tau=20$ ժամ թրծումից հետո, շնորհիվ վերաբյուրեղացման, կառուցվածքը ստացվել է հավասարակշռված (նկ. 3): Միաժամանակ հատիկների սահմանագծերում անջատվել են FeAl₃ և NiAl₃ ինտերմետաղական ֆազերը, որոնք կայուն են և չեն լուծվում մայրակուլում նույնիսկ միսման ժամանակ (նկ. 4): Նշված ֆազերի առաջացումը խանգարում է միսման ժամանակ գերհալեցած պինդ լուծույթի առաջացման գործընթացին, հետևապես և ծերացման ժամանակ ինտերմետաղական ֆազերի անջատմանը: Սակայն այս գործընթացի ազդեցությունն արդյունավետ է միայն բնական ծերացման ժամանակ: Եվ քանի որ այլումինային հրամուր համաձուլվածքները բնական ծերացման չեն ենթարկվում՝ վերադարձի գործընթացից խուսափելու համար, հետևապես՝ նշված ֆազերի ազդեցությունն աննշան է: Նշվածի վառ ապացույցն է բարձր մեխանիկական հատկությունների պահպանումը բարձր ջերմաստիճաններում: Ամրության և կարծրության աճը պայմանավորված է արհեստական ծերացման ժամանակ CuAl₂, Al₂CuMg, Al₃FeNi, Al₃Cu₂Fe և Al₃CuNi ինտերմետաղական ֆազերի անջատմամբ, որը ցույց է տրված նկ. 5-ում:



ա)



բ)



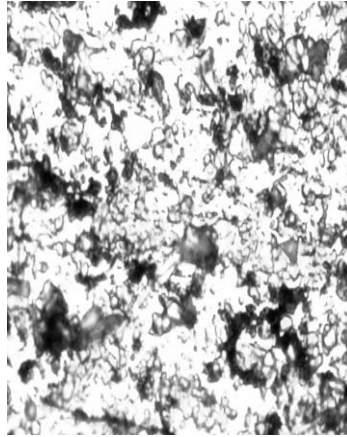
գ)

Նկ. 3. 2,5%Cu+1,8%Mg+1,2%Ni+1,2%Fe+Al₉₀ այլումինային հրամուր փոշեհամաձուլվածքի միկրոկառուցվածքը տաք արտամղումից և թրծումից հետո ($\times 200$). $T_w=525^{\circ}\text{C}$, $\tau_w=30$ րոպե, $T_p=525^{\circ}\text{C}$, $\tau_p=20$ ժամ: ա) $\lambda=3$, բ) $\lambda=4$, գ) $\lambda=5$

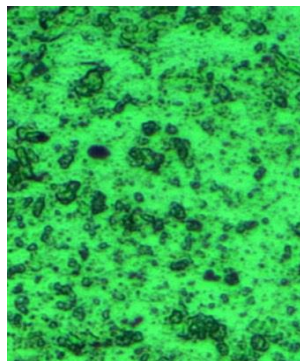
Ինչպես երևում է նկ. 3-ից, ծերացման ջերմաստիճանից կախված՝ տեղի է ունենում ինտերմետաղական ֆազերի կոագուլացիայի գործընթաց, ընդ որում, որքան բարձր է ջերմաստիճանը, այնքան մեծ է կոագուլացիայի արագությունը, որով և բացատրվում է փոշեհամաձուլվածքի մեխանիկական հատկությունների անկումը և սողքի արագության մեծացումը:

Տաքացման ժամանակ մշակված համաձուլվածքում տեղի ունեցող ֆազային փոխակերպությունների ընթացքը հետազոտելու նպատակով իրականացվել է դեփվատագրական վերլուծություն. ջերմաստիճանի փոփոխությունը՝ $T=20\ldots 600$ °C,

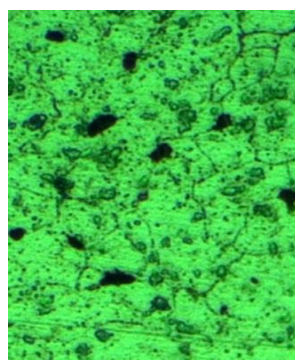
ջերմաստիճանի փոփոխման արագությունը՝ $V_T=10\text{ }^{\circ}\text{C/րոպե}$, զանգվածի փոփոխությունը՝ մինչև $TG=50\text{ }\mu\text{գր}$, զանգվածի փոփոխման արագությունը՝ $DTG=3\text{ }\mu\text{գր/վրկ}$ և էնթալպիայի փոփոխությունը՝ $DTA=5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (նկ. 6):



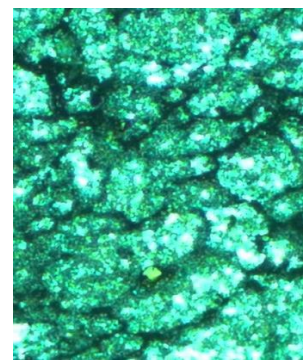
Նկ. 4. $2,5\%Cu+1,8\%Mg+1,2\%Ni+1,2\%Fe+Al_{\text{մ}}$ ալյումինային հրամուր փոշեհամաձուլվածքի միկրոկառուցվածքը մխումից հետո ($\times 500$). $T_{\text{ա}}=525\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\tau_{\text{ա}}=30\text{ րոպե}$, $\lambda=5$, $T_{\text{թ}}=525\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\tau_{\text{թ}}=20\text{ ժամ}$, $T_{\text{ս}}=535\text{ }^{\circ}\text{C}$, մխումը ջրում



ա)

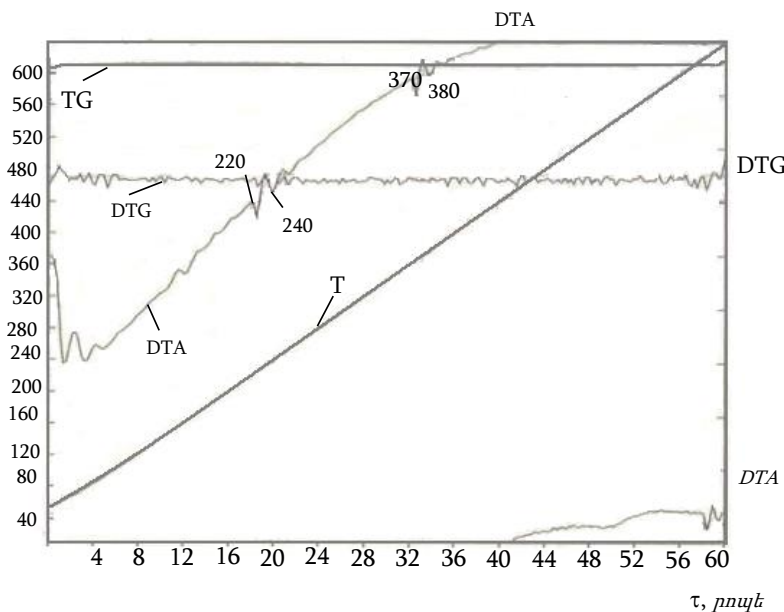


բ)



գ)

Նկ. 5. $2,5\%Cu+1,8\%Mg+1,2\%Ni+1,2\%Fe+Al_{\text{մ}}$ ալյումինային հրամուր փոշեհամաձուլվածքի միկրոկառուցվածքը ձերացումից հետո ($\times 500$). $T_{\text{ա}}=525\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\tau_{\text{ա}}=30\text{ րոպե}$, $\lambda=5$, $T_{\text{թ}}=525\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\tau_{\text{թ}}=20\text{ ժամ}$, $T_{\text{ս}}=535\text{ }^{\circ}\text{C}$, մխումը ջրում. ա) $T_{\delta}=150\text{ }^{\circ}\text{C}$, բ) $T_{\delta}=200\text{ }^{\circ}\text{C}$, գ) $T_{\delta}=250\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\tau_{\delta}=25\text{ ժամ}$



Նկ. 6. 2,5%Cu+1,8%Mg+1,2%Ni+1,2%Fe+Al₁₀₀ ալյումինային հրամուր փոշեհամաձուլվածքի դերիվատագիրը. T-ն նմուշի տաքացման ջերմաստիճանի փոփոխությունն է, TG-ն՝ զանգվածի փոփոխությունը, DTG-ն՝ զանգվածի փոփոխության արագությունը, DTA-ն՝ դիֆերենցիալ ջերմային անալիզի կորը կամ էնթալպիայի փոփոխությունը

Ինչպես երևում է նկ. 6-ից, դերիվատագրի վրա առկա են երկու էնդոթերմ փոխակերպություններ: Առաջին փոխակերպությունը սկսվել է 220 °C-ում և ավարտվել 240 °C-ում: Այն արդյունք է $Al+Mg_5Al_8 \rightarrow Al$ պինդ ֆազային ռեակցիայի, որը համընկնում է Al-Mg վիճակի դիագրամի 1,8% Mg պարունակող համաձուլվածքի տաքացման ժամանակ ֆազային փոխակերպությանը: Տաքացման ժամանակ Mg_5Al_8 ինտերմետաղական միացությունն ամբողջությամբ լուծվում է պինդ ալյումինում, ընդ որում, Mg-ի պարունակությունը էվտեկտիկայի ջերմաստիճանում, որը հավասար է 450 °C, կարող է հասնել 17,4% [14]: Ինչ վերաբերում երկրորդ փոխակերպությանը, որը տեղի է ունենում 370...380 °C-ում, ապա այն արդյունք է $Al+CuAl_2 \rightarrow Al$ պինդ ֆազային փոխակերպության, որը համընկնում է Al-Cu վիճակի դիագրամի 2,5% Cu պարունակող համաձուլվածքի տաքացման ժամանակ տեղի ունեցող ֆազային փոխակերպությանը [14]:

Դերիվատագրից հետևում է, որ այլ ֆազային փոխակերպություններ, ինչպես նաև զանգվածի փոփոխություն, օքսիդացման կամ որևէ ֆազի անջատման պատճառով, տեղի չի ունեցել:

Արդյունքները կրկին անգամ ապացուցում են կոմպոնենտների և ջերմային մշակման տեխնոլոգիայի ճիշտ ընտրությունը, որի արդյունքում ապահովվում է ալյումինի հիմքով հրամուր համաձուլվածքի ստացումը:

Այսպիսով, բացահայտվել է, որ տաք արտամղումից հետո փոշեհամաձուլվածքի կառուցվածքը անհավասարակշռված է, իսկ հատիկները՝ դեֆորմացված, ընդ որում, հատիկների դեֆորմացիայի աստիճանը կախված է արտամղման գործակցից (λ): Որքան մեծ է արտամղման գործակցը, այնքան մեծ է դեֆորմացիայի աստիճանը: Ցույց է տրված, որ $\lambda \geq 4$ -ի դեպքում ստացվում է պրակտիկորեն անծակոտկեն կառուցվածք: Թրծումից հետո կառուցվածքը ստացվում է հավասարակշռված, միաժամանակ հատիկների սահմանագծերում անջատվում են FeAl_3 և NiAl_3 ինտերմետաղական ֆազերը, որոնք կայուն են ու չեն լուծվում մայրակում միմյան ժամանակ և ապահովում են բարձր ջերմաստիճաններում միմյան մանրահատիկ կառուցվածքի ստացումը: Ծեղացման ժամանակ ամրության և կարծրության աճը պայմանավորված է CuAl_2 , Al_2CuMg , Al_3FeNi , $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$ և Al_6CuNi ինտերմետաղական ֆազերի անջատմամբ, ընդ որում, ծեղացման ջերմաստիճանից կախված՝ տեղի է ունենում այս ֆազերի կոագուլացիայի գործընթաց, և որքան բարձր է ջերմաստիճանը, այնքան մեծ է կոագուլացիայի աստիճանը, հետևապես՝ և՛ մեխանիկական հատկությունների անկումը, և՛ սողքի արագության մեծացումը:

Փոշեհամաձուլվածքի դերիվատագրական վերլուծությամբ բացահայտվել է, որ տաքացման ժամանակ տեղի են ունենում պինդ ֆազային ռեակցիաներ, որոնք համընկնում են Al-Mg և Al-Cu համաձուլվածքների վիճակի դիագրամների փոխակերպություններին, այսինքն՝ այլումինի մեջ սկսում են լուծվել Mg_5Al_8 և CuAl_2 ֆազերը: Տաքացման ժամանակ զանգվածի փոփոխություն, օքսիդացման կամ որևէ նոր ֆազի անջատման պատճառով, տեղի չի ունենում, ինչը կրկին անգամ ապացուցում է կոմպոնենտների և ջերմային մշակման տեխնոլոգիայի ընտրության ճշտությունը:

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. **Колачев Б.А., Ливанов В.А., Елагин В.И.** Металловедение и термическая обработка цветных металлов.- М.: Металлургия, 1981.- 416 с.
2. **Елагин В.И.** Пути развития высокопрочных и жаропрочных конструкционных алюминиевых сплавов в XXI столетии // *МиТОМ.*- 2007.- № 9.- С. 3-11.
3. **Добаткин В.И., Елагин В.И., Мудренко Г.А.** Процессы обработки легких и жаропрочных сплавов.- М.: Наука, 1981.- 270 с.
4. **Квасов Ф.И., Фридляндер И.Н.** Алюминиевые сплавы типа дюралюмин.- М.: Металлургия, 1984.- 240 с.
5. **Елагин В.И.** Актуальные вопросы металловедения и технологии легких сплавов // *Технология легких сплавов.*- 2004.- № 5.- С. 25-29.
6. **Филатов Ю.А.** Деформируемые сплавы на основе системы Al-Mg-Sc // *МиТОМ.*- 1996.- № 6.- С. 33-36.
7. **Елагин В.И.** Состояние и пути повышения трещиностойкости высокопрочных алюминиевых сплавов // *МиТОМ.*- 2002.- № 9.- С. 10-19.
8. **Добаткин В.И., Елагин В.И.** Гранулируемые алюминиевые сплавы.- М.: Металлургия, 1981.- 179 с.

9. **Гринева С.И., Коробко В.Н., Кузнецов А.И., Сычев М.М.** Алюминий и сплавы на его основе.- СПб.: СПбГТИ (ТУ), 2003.- 22 с.
10. **Пейсахов А.Н.** Материаловедение и технология конструкционных материалов. - СПб.: Михайлова В.А., 2003.- 416 с.
11. **Fries S.G., Oates W.A.** A thermodynamic assessment of the Au-Cu system // CALPHAD22.- 1998. - № 3. - P. 335-354.
12. **Աղբալյան Ս.Գ., Սաֆարյան Տ.Ն.** Հրամուր պլումինային փոշեհամաձուլվածքների տաք արտադրման գործընթացի փորձագիտական հետազոտումը // ՀՀ ԳԱԱ և ՀՊՃՀ տեղեկագիր. ՏԳ սերիա.- 2010.- Հատ. 62, №4.- էջ 367-376:
13. **Աղբալյան Ս.Գ., Սաֆարյան Տ.Ն.** Ալյումինային հրամուր փոշեհամաձուլվածքի բովախառնուրդի մասման գործընթացի հետազոտումը և օպտիմալ ռեժիմների ընտրումը // ՀՊՃՀ (Պոլիտեխնիկ) Լրաբեր. Գիտական և մեթոդական հոդվածների ժողովածու.- Երևան, 2010.- Հատ. 2, №2.- էջ 395-399:
14. **Мондольфо Л.Ф.** Структура и свойства алюминиевых сплавов / Пер. с англ.- М.: Металлургия, 1979.- 640 с.

ՀՊՃՀ (ՊՈԼԻՏԵԽՆԻԿ): Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 30.01.2014:

С.Г. АГБАЛЯН, Т.Н. САФАРЯН, А.В. АНДРИАСЯН, В.Г. ВАРДАНЫАН

ИССЛЕДОВАНИЕ И МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ ЖАРОПРОЧНЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ ПОРОШКОВЫХ СПЛАВОВ

В результате комплексных исследований выявлено, что после закалки и старения структура жаропрочного алюминиевого порошкового сплава состава 2,5%Cu+1,8%Mg+1,2%Ni+1,2%Fe+Al_{ост} является гетерогенной и состоит из твердого раствора на основе алюминия и интерметаллических фаз CuAl₂, Al₂CuMg, Al₉FeNi, Al₇Cu₂Fe, Al₆CuNi, которые в процессе старения выделяются из пересыщенного твердого раствора на основе алюминия, обеспечивая высокие механические свойства до температур в диапазоне 300...350 °С.

Ключевые слова: алюминиевый порошок, металлические порошки, прессование, горячая экструзия, отжиг, закалка, старение, твердый раствор, интерметаллическая фаза, твердость, прочность, жаропрочность.

S.G. AGHBALYAN, T.N. SAFARYAN, A.V. ANDRIASYAN, V.G. VARDANYAN

INVESTIGATION AND METALLOGRAPHIC ANALYSIS OF THE STRUCTURE FORMATION PROCESS OF HEAT-RESISTANT ALUMINIUM POWDER ALLOYS

As a result of complex investigations, it is revealed that after quenching and ageing, the structure of heat-resistant aluminium powder alloy 2,5% Cu +1,8% Mg +1,2% Ni +1,2% Fe + Al_{ost} is heterogeneous and consists of a solid solution based on aluminium and intermetallic phases CuAl₂, Al₂CuMg, Al₉FeNi, Al₇Cu₂Fe, Al₆CuNi, precipitating in the aging process from the supersaturated solid solution based on aluminium, providing high mechanical properties at temperatures in the range 300 ... 350 °C.

Keywords: aluminium powder, metal powders, compaction, hot extrusion, annealing, hardening, ageing, solid solution, intermetallic phase, hardness, strength, heat resistance.

Լ.Ե. ՍԱՐԳՍՅԱՆ, Ա.Մ. ՀՈՎՀԱՆՆԻՍՅԱՆ, Դ.Գ. ՎԱՐԴԱՆՅԱՆ

ՊՂՆՁԻ ԿՈՐՁՈՒՄԸ ՊՂԻՆՁ-ՑԻՆԿ-ԿԱՊԱՐԱՅԻՆ ՍՈՒԼՖԱՏԱՑՎԱԾ ԲՈՎՎԱԾՔԻ ՏԱՐԲԱԼՈՒԾՄԱՆ ԼՈՒԾՈՒՅԹԻՑ

Ներկայացված են ցինկի և կապարի բարձր պարունակությամբ սուլֆիդապղնձային խտանյութի սուլֆատացված բովվածքի տարրալուծման լուծույթից պղնձի կորզման տեխնոլոգիական առանձնահատկությունները: Ցույց է տրված Cu^{2+} - Zn^{2+} - Fe^{2+} - Fe^{3+} - SO_4^{2-} - H_2O սուլֆատ-թթվային լուծույթից պղնձի ընտրողական կորզման գործընթացում ցեմենտացիայի եղանակի գերակայության նպատակահարմարությունը:

Առանցքային բառեր. սուլֆիդապղնձային խտանյութ, տարրալուծման սուլֆատ-թթվային լուծույթ, ցեմենտացիա, ընտրողական կորզում:

Ներածություն. Հետազոտության համար որպես ելանյութ հանդիսացող՝ ցինկի և կապարի բարձր պարունակությամբ տեղական պղնձային խտանյութի սուլֆատացված բովվածքի 2 %-անոց ծծմբաթթվային տարրալուծման լուծույթում պղինձը, երկաթը և ցինկը առկա են բացարձակապես իրենց սուլֆատների տեսքով (CuSO_4 , FeSO_4 , $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$, ZnSO_4), որը, ինչպես հայտնի է, բարենպաստ պայման է՝ հիդրոմետալուրգիական եղանակներով այդ մետաղների արդյունավետ կորզման համար:

Աշխատանքի նպատակն է ուսումնասիրել նշված լուծույթից անկորուստ ձևով դրանում պարունակվող արժեքավոր մետաղներից պղնձի ընտրողական կորզման գործընթացը և հաստատագրել դրա օպտիմալ տեխնոլոգիական պարամետրերը՝ ստանդարտ որակի մետաղարտադրանքի ստացման համար:

Փորձարկման մեթոդները. Մետաղական իոնների կոնցենտրացիաները լուծույթներում չափվել են ատոմա - աբսորբցիոն սպեկտրասկոպիայի մեթոդով (AAS): Հիմնական և օժանդակ բաղադրիչների պարունակությունները պինդ արգասիքներում որոշվել են քիմիական և էմիսիոն-սպեկտրալ վերլուծության եղանակներով: Պինդ նյութերի ֆազային բաղադրություններն ուսումնասիրվել են ռենտգենակառուցվածքային վերլուծության մեթոդով:

Հետազոտության արդյունքների քննարկումը. Հաշվի առնելով հետազոտվող լուծույթի բավականին բարդ կազմությունը (աղ.1 [1]), ինչպես նաև դրանում պարունակվող որոշ մետաղ-իոնների վերականգնման ռեակցիաների ստանդարտ պոտենցիալների զգալի մոտիկությունը (օրինակ, $E^{\circ}_{\text{Cu}^{2+} + 2e = \text{Cu}} = 0,340$ Վ, իսկ $E^{\circ}_{\text{Fe}^{3+} + 3e = \text{Fe}^{2+}} = 0,771$ Վ [2])՝ որպես վերականգնիչ կողմից ռեակցիայի լիարժեք ընտրողականությանը խանգարող գործոն՝ լուծույթից առաջին հերթին պղնձի ընտրողական կորզման գործընթացը հետազոտվել է երկու տեխնոլոգիական տարբերակների՝ <<էքստրակցիա-ռեէքստրակցիա>> և <<ցեմենտացիա>> մեթոդների հա-

մադրամբ՝ դրանց արդյունքների հիման վրա արտադրական պայմանների համար առավել օպտիմալ գործընթացի երաշխավորման նպատակով:

Աղյուսակ 1

Տարրալուծման հեղուկ արգասիքի (մայրակ-լուծույթի) իոնային բաղադրությունը

Իոնների կոնցենտրացիաները սուլֆատացված բովվածքի տարրալուծման լուծույթում (գ/լ)				
Cu ²⁺	Zn ²⁺	Fe ²⁺	Fe ³⁺	Pb ²⁺ և այլ Pb-իոն
19,38	4,08	20,90	0,98	չեն հայտնաբ.*

* Ելանյութ-խտանյութի երրորդ (ըստ արժեքի) բաղադրիչը՝ կապարը, նախապես կորզվել է բովվածքի թթվային տարրալուծման սորախցուկից հատուկ տեխնոլոգիայով (տե՛ս [1]):

Գիտափորձի առաջին փուլում, էքստրակցիայի-ռեէքստրակցիայի եղանակով [3] լուծույթում առկա Cu²⁺ իոնների կորզման փորձերում, ժամանակակից պրակտիկայում հայտնի <<aldoximes-ketoximes>> դասի օրգանական էքստրագենտների [4, 5] դժվարամատչելիության պատճառով, դրանց փոխարեն օգտագործվել են զոված բուսական յուղեր (ձիթապտղի, եգիպտացորենի, սոյայի, արևածաղկի), որոնք ըստ [6] արտոնագրի հեղինակների, պղնձի երկվալենտ իոնների նկատմամբ նույնպես օժտված են բարձր կատիոնափոխանակիչ ընտրողականությամբ այլ մետաղների (հատկապես երկաթի) իոններ պարունակող ջրային միջավայրերում: Այդ նպատակով սկզբում պղինձը կորզվել է 8 գ/լ Cu²⁺, 8 գ/լ Fe²⁺, 0,5 գ/լ Fe³⁺ և 4 գ/լ Zn²⁺ բաղադրությամբ մոդելային ջրային լուծույթից, որի պատրաստման համար օգտագործվել են ռեակտիվային CuSO₄·5H₂O, ZnSO₄·7H₂O և FeSO₄·7H₂O, ինչպես նաև տեխնիկական մաքրությամբ Fe₂(SO₄)₃ սուլֆատներ: 200-ական մլ ծավալով լուծույթի փորձանմուշներին ավելացվել է 80-ական մլ ծավալով էքստրագենտ (բուսական յուղ) և խառնվել 4,5 ժամ տևողությամբ մթնոլորտային ճնշման և սենյակային ջերմաստիճանի պայմաններում, խառնուրդի pH–ը պահելով 10,5...11,0 սահմաններում (NaOH-ի պարբերաբար ներմուծմամբ): Էքստրակցիայից հետո խառնուրդները թողնվել են հանգստանալու 24 ժամ/ա ընթացքում, որպեսզի օրգանական և ջրային ֆազերը առանձնանան միմյանցից: Հանգստից հետո փորձանոթների վերին մակարդակներում կուտակված օրգանական ֆազերը (Cu²⁺ իոններով հագեցած էքստրագենտները) խնամքով անջատվել են ջրային ֆազերից: AAS մեթոդով չափվել են Cu²⁺-իոնների մնացորդային կոնցենտրացիաները ջրային ֆազերում, և յուրաքանչյուր փորձի համար որոշվել է էքստրակցիայի ժամանակ Cu²⁺ իոնների բաշխման գործակիցը՝

$$D_{բաշխ} = C_{օրգ} / C_{ջր}, \quad (1)$$

որտեղ C_{օրգ.}–ն օրգանական ֆազ անցած պղնձի կոնցենտրացիան է, C_{ջր.} –ը՝ ջրային ֆազում մնացած պղնձի կոնցենտրացիան:

Պղնձի ռեէքստրակցիան Cu²⁺ իոններով հագեցած օրգանական մասից իրակացվել է թորած ջրով պատրաստված ուժեղ ծծմբաթթվային լուծույթով (230 գ/լ H₂SO₄)

միատեսակ ջերմաստիճանային և ժամանակային պայմաններում: Ընդ որում, ռե-
էքստրակցիայի լուծույթի ծավալը վերցվել է 2 անգամ ավելի պակաս (100 մլ), քան
էքստրակցիայի լուծույթինը, որպեսզի ապահովված լինի նրանում պղնձի հարմար
կոնցենտրացիա՝ հետագա էլեկտրակորզման համար: Պղնձի իոններից բեռնաթափ-
ված էքստրագենտների հեռացումից հետո ստացված ջրային ֆազերում (ռեէքս-
տրակտներում) AAS վերլուծության մեթոդով չափվել են Cu^{2+} իոնների կոնցենտրա-
ցիաները: Երկաթի ու ցինկի իոնների առկայությունը նրանցում պարզաբանվել է
որակական քիմիական վերլուծության միջոցով:

Ցեմենտացիայի (քիմիական նստեցման) եղանակով [7] ելային լուծույթից (տե՛ս
աղ.1) պղնձի անմիջական կորզումը՝



ռեակցիայով կատարվել է երկաթի տաշեղների միջոցով (սենյակային ջերմաստի-
ճանում, լուծույթի անընդհատ խառնումով 30 րոպեի ընթացքում): Ցեմենտատը
(պղնձափոշին) առանձնացվել է երկաթյա տաշեղներից ու լուծույթից՝ տղմաթափ-
ման և ֆիլտրման միջոցով, լվացվել է 0,5%-անոց ծծմբաթթվային լուծույթով (տեսքի
պայծառացման համար), այնուհետև մաքրվել է 2% - անոց սոդայի (Na_2CO_3) լուծույ-
թով և չորացվել 110 °C- ում 2 ժամվա ընթացքում: Ստացված պղնձափոշին ենթարկ-
վել է ռենտգենակառուցվածքային և էմիսիոն-սպեկտրալ վերլուծության: Պղնձի
կորզումից հետո ֆիլտրված լուծույթում որոշվել է Cu^{2+} իոնների մնացորդային կոն-
ցենտրացիան, և հաշվվել է պղնձի ցեմենտացիայի (կորզման) գործակիցը.

$$K_{\text{Cu-ցեմ.}} = M_{\text{Cu-ցեմ.}} / M_{\text{Cu-զր.}}, \quad (3)$$

որտեղ $M_{\text{Cu-ցեմ.}}$ -ը մաքուր պղնձափոշու զանգվածն է ցեմենտատում, $M_{\text{Cu-զր.}}$ -ը՝
պղնձի ընդհանուր զանգվածը ելային ջրային լուծույթում: Վերլուծությունների և
հաշվարկների արդյունքները բերված են աղ.2-ում:

Էքստրակցիայի և ցեմենտացիայի եղանակներով ստացված փորձնական արդ-
յունքների համադրությունը ցույց է տալիս, որ սկզբունքորեն այդ երկուսն էլ կիրա-
ռելի են սուլֆատ-թթվային լուծույթներից պղնձի կորզման համար: Ընդ որում, կա-
րելի է հաստատագրել, որ այդ գործընթացի համար լավագույն էքստրագենտ է
եզիպտացորենի յուղը՝ $D_{\text{բաշխ.}} = 1599$ ցուցանիշով (վատագույն էքստրագենտը սոյայի
յուղն է, որի դեպքում $D_{\text{բաշխ.}} = 65$), ինչը համեմատելի է գրականության մեջ առկա
սովյալների հետ [6]: Երկաթով ցեմենտացիայի դեպքում պղնձի կորզման գործակիցը
հասնում է 99,1% -ի, որը նույնպես լիովին ընդունելի ցուցանիշ է մետաղի նվա-
զագույն կորստի ապահովման տեսակետից:

Էքստրակցիայի և ցեմենտացիայի մեթոդներով Cu^{2+} - Fe^{2+} - Fe^{3+} - Zn^{2+} - SO_4^{2-} - H_2O լուծույթներից պղնձի կորզման տվյալների համադրությունը

Էքստրակցիայի կամ ցեմենտացիայի տեսակը	Էքստրակցիա կամ ցեմենտացիա		Ռեքստրակցիա կամ ֆագերի բաժանում		Cu^{2+} իոն. մնացորդ. կոնցենտ. լուծույթում (q/l)*	Երկաթի առկայություն. էքստրակցիայում	Ցինկի առկայություն. էքստրակցիայում	D _{բաշխ.} կամ K _{ցեմ.}
	Լուծույթի pH	Տևող, ժամ	Լուծույթի pH	Տևող, ժամ				
Արևածաղկի յուղ	10,5...11,0	4,5	4,0...4,5	4,5	0,070	Շատ	Շատ	113
Սոյայի յուղ	10,5...11,0	4,5	4,0...4,5	4,5	0,120	Շատ	Շատ	65
Ձիթապտղի յուղ	10,5...11,0	4,5	4,0...4,5	4,5	0,020	Շատ	Քիչ	399
Եգիպտացորենի յուղ	10,5...11,0	4,5	4,0...4,5	4,5	0,005	Շատ	Քիչ	1599
Ցեմենտացիա երկաթի տաշեղներով	5,5...6,5	0,5	Պղնձի առանձնացում, լվացում, չորաց.		0,180	-	-	0,991

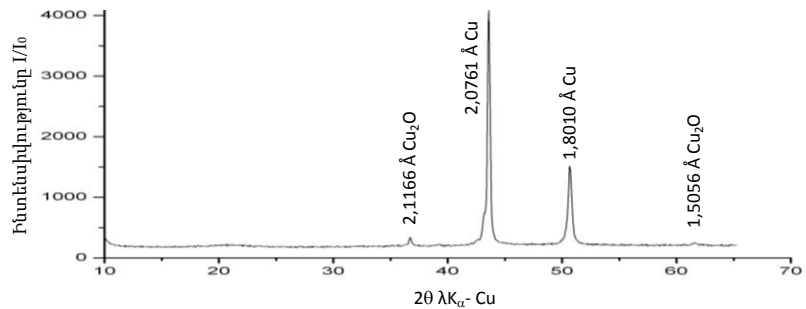
*Վերլուծությունները կատարվել են ԼՄԻ ՓԲԸ-ում:

Սակայն էքստրակցիայի բաղադրությունների վերլուծությունից պարզվում է, որ նրանցում առկա է շատ կամ քիչ քանակությամբ երկաթ, ինչպես նաև ցինկ, որոնք, անշուշտ, կարող են հետագա էլեկտրոլիզի ժամանակ աղտոտել պղնձի կաթոդային նստվածքը: Դրանից հետևում է, որ էքստրակցիայի մեթոդով (համենայնդեպս՝ եգիպտացորենի յուղով) հնարավոր է Cu^{2+} - Zn^{2+} - Fe^{2+} - Fe^{3+} - SO_4^{2-} - H_2O համակարգի լուծույթներից պղինձը կորզել գրեթե ամբողջությամբ, բայց ոչ լիարժեք մաքուր վիճակում: Ակնհայտ է, որ առաջին հերթին դրան խանգարում են լուծույթում առկա Fe^{3+} իոնները, որոնք, փոխազդելով լուծույթի pH-ը կարգավորող NaOH -ի հետ, ընդունակ են $\text{Fe}(\text{OH})_3$ թաղանթներ գոյացնելու օրգանական մասի մակերեսին, իսկ Zn^{2+} իոնները, իրենց հերթին, հավանաբար, լուծված օդի թթվածնի շնորհիվ մասնակիորեն օքսիդանում են՝ գոյացնելով $\text{Zn}(\text{OH})_2$ թաղանթներ:

Մինչդեռ արդյունքներից երևում է, որ ցեմենտացիայի պրոցեսը գերծ է նշված թերություններից, ինչը, ակնհայտորեն, պայմանավորված է այն հանգամանքով, որ այս դեպքում ցինկը չի կարող խանգարել պղնձի քիմիական վերականգնմանը երկաթով, քանի որ շատ մեծ է Cu^{2+} և Zn^{2+} իոնների վերականգնման ռեակցիաների ստանդարտ էլեկտրոդային պոտենցիալների տարբերությունը (համապատասխանաբար -0,763 Վ և 0,340 Վ), առավել ևս երկաթը խանգարիչ չէ, քանի որ ինքն է պղնձի նստեցնողը (ցեմենտատորը):

Փորձի տվյալներով, երկաթի տաշեղներով պղնձի ցեմենտացման (կորզման) գործակիցը հասնում է 99,1 %, ինչը լիովին ընդունելի ցուցանիշ է:

Ռեհոստացիայի և ցեմենտացիայի վերլուծության (DPOH-2,0 , CuK_α -ճառագայթում) տվյալներով (նկ.)՝ ելային լուծույթից ցեմենտացիայի եղանակով կորզված պղինձն ունի միաֆազ կատարյալ կենտրոնանիստ խորանարդային ցանցով բյուրեղային կառուցվածք (ռեհոստացիայի վրա Cu_2O -ի փոքր ինտենսիվությամբ դիֆրակցիոն զոնների առկայությունը պղնձափոշու ոչ բավարար մաքրման պատճառով է):



Նկ. Ցեմենտացիայի եղանակով ստացված պղնձափոշու ռենտգենագիրը (դիֆրակտոգրամի հանույթը և ֆազերի բնորոշ զծերի նմանարկումն ըստ [8] տվյալների կատարված է ՀՊՀՀ ռենտգենաչափական լաբորատորիայում)

Էմիսիոն-սպեկտրալ վերլուծության տվյալներով (աղ.3) ստացված պղնձափոշին իր մաքրությամբ չի զիջում նմանատիպ ստանդարտ նմուշներին [9]:

Աղյուսակ 3

Ստացված պղնձափոշու էմիսիոն-սպեկտրալ վերլուծության արդյունքները *

Պղնձափոշու տեսակը	Cu ընդհ., %	Խառնուրդների պարունակությունը, %						
		Sb	As	Fe	Pb	S	O	Zn
Փորձարարական	99,5	-	0,001	0,018	0,03	0,01 (SO ₄ ²⁻)	0,005	հետքեր
ՄՄС-В ГОСТ 4960-75	99,5	0,005	0,003	0,018	0,05	0,01 (SO ₄ ²⁻)	0,005	-
ՄՄС-Н ГОСТ 4960-75	99,5	0,005	0,003	0,060	0,05	0,01 (SO ₄ ²⁻)	0,50	-

*Վերլուծությունները կատարվել են ՀՀ ԳԱԱ ԵԳԻ լաբորատորիայում:

Հետազոտված Cu^{2+} - Zn^{2+} - Fe^{2+} - Fe^{3+} - SO_4^{2-} - H_2O տարրալուծման լուծույթից պղնձի արդյունավետ կորզումից հետո մնացած սուլֆատ-թթվային լուծույթն իր կազմով ավելի հարմար է հետազայում երկաթի և ցինկի ընտրողական կորզման համար:

Եզրակացություններ.

1. Ցինկի և կապարի բարձր պարունակությամբ սուլֆիդապղնձային խտանյութի սուլֆատացված բովվածքի տարրալուծման Cu^{2+} - Zn^{2+} - Fe^{2+} - Fe^{3+} - SO_4^{2-} - H_2O լուծույթից պղինձը ընտրողական ձևով առավել արդյունավետ է կորզել երկաթով ցեմենտացիայի եղանակով:

2. Ցեմենտացված պղնձափոշին իր մաքրությամբ չի զիջում համապատասխան ստանդարտ մակնիշներին:

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. **Варданын Д.Г.** Выщелачивание огарка медного концентрата с повышенным содержанием цинка и свинца //Материалы III Международной конференции по химии и химической технологии.- Ереван, 2013. – С. 249-251.
2. **Մարգարյան Լ.Ե.** Մետալուրգիական հեռանկարային տեխնոլոգիական գործընթացներ: Մաս 2. -Ե.: Ճարտարագետ, 2005.- 210 с.
3. **Mark E. Schlesinger, Matthew J. King, Kathryn C. Sole, William G. Davenport.** Extractive Metallurgy of Copper. Fifth Edition.- Elsevier Ltd, 2011.- 456 p.

4. **Hurtado-Guzma'n, C., & Menacho, J.M.** Oxime degradation chemistry in copper solvent extraction plants / P. A. Rivieros, D. G. Dixon, D. B. Dreisinger & J. H. Menacho (Eds.) // Copper-Cobre. 2003.- Vol. VI, Book 2: Hydrometallurgy of copper: Modelling, impurity control and solvent extraction.-Montreal, 2003.- P. 719-734.
5. **Tinkler, O. S., Cronje, I., Soto, A., Delvallee, F., & Hangoma, M.** The ACORGA OPT-series: industrial performance vs. aldoxime:ketoхime reagents. In ALTA copper 2009.- Melbourne, Australia: ALTA Metallurgical Services, 2009.
6. **Патент RU 2155818.** Способ экстракции меди из водных растворов. -10.06. 1999.
7. **Смирнов И.И.** Физико-химические основы и технология получения порошков тяжелых цветных металлов.- Красноярск: Изд-во Красноярск.ун-та, 1984.-128 с.
8. ASTM Card File.- ASTM, Philadelphia.- 1969.
9. ГОСТ– 4960-75. Порошок медный. Технические условия.-М.: ИПК, Изд-во стандартов, 1998.- 12 с.

ՀղձՀ (ՊՈԼԻՏԵԽՆԻԿ): Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 26.03.2014:

Л.Е. САРГСЯН, А.М. ОГАНЕСЯН, Д.Г. ВАРДАНЫАН

ИЗВЛЕЧЕНИЕ МЕДИ ИЗ РАСТВОРА ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ МЕДЬ-ЦИНК-СВИНЦОВОГО СУЛЬФАТИЗИРОВАННОГО ОГАРКА

Представлены технологические особенности извлечения меди из раствора выщелачивания сульфатизированного огарка сульфидномедного концентрата с повышенным содержанием цинка и свинца. Показана целесообразность применения метода цементации для процесса избирательного извлечения меди из сульфатнокислого раствора Cu^{2+} - Zn^{2+} - Fe^{2+} - Fe^{3+} - SO_4^{2-} - H_2O .

Ключевые слова: сульфидномедный концентрат, сульфатнокислый раствор выщелачивания, цементация, избирательное извлечение.

L.Ye. SARGSYAN, A.M. HOVHANNISYAN, D.G. VARDANYAN

EXTRACTION OF COPPER FROM THE LEACHING SOLUTION OF COPPER-ZINC-LEAD SULPHATIZED ROAST-CALCINE

The technological peculiarities of copper extraction from the leaching solution of sulphatized roast-calcine of copper-sulphide concentrate with high content of zinc and lead are introduced. The expediency of application of the cementation method for the selective extraction of copper from Cu^{2+} - Zn^{2+} - Fe^{2+} - Fe^{3+} - SO_4^{2-} - H_2O sulphate-acidic solution is shown.

Keywords: copper-sulphide concentrate, sulphate-acidic leaching solution, cementation, selective extraction.

В.А. МАРТИРОСЯН, К.В. САРКИСЯН, М.Э. САСУНЦЯН,
Ю.О. ЛИСОВСКАЯ

**ТЕРМООБРАБОТКА ДРМБОНСКОГО ЗОЛОТО-МЕДНОГО
СУЛЬФИДНОГО КОНЦЕНТРАТА ПРИ СЕРНОКИСЛОТНОМ
ВЫЩЕЛАЧИВАНИИ**

Исследована возможность переработки дрмбонского золото-медного сульфидного концентрата методом термообработки (обжига) с целью дальнейшей интенсификации процессов сернокислотного выщелачивания. Выбраны оптимальные условия термообработки и выщелачивания для обеспечения максимального выхода меди в раствор.

Ключевые слова: термообработка, дрмбонский медно-сульфидный концентрат, сернокислотное выщелачивание, медь, золото.

Введение. В последнее время в металлургической промышленности переработки цветных металлов гидрометаллургия занимает прочное место. Основным недостатком гидрометаллургии по сравнению с пирометаллургией является невысокая интенсивность процесса. Для обеспечения более совершенного в экологическом отношении гидрометаллургического производства важное значение имеет интенсификация операции выщелачивания, а именно - повышение скорости сернокислотного выщелачивания ценных компонентов из минерального сырья методом термической активации [1,2]. Особый интерес представляет термическая обработка сульфидов [3-5], являющихся основой рудного сырья в производстве многих цветных металлов и в то же время одним из наиболее труднорастворимых в неорганических растворителях классов соединений. Характерным примером термической активации сырья, применяемого в промышленных масштабах, является сульфатизирующий обжиг медных концентратов, в процессе которого высшие сульфиды (пирит, пирротин, халькопирит, борнит) диссоциируют с удалением части серы в элементной форме и с образованием сульфидов железа (типа триолита). Последние отличаются значительной реакционной способностью при окислительном или кислотном режиме выщелачивания, в результате чего извлекаемые компоненты переходят в более быстро и полно растворимые формы и одновременно обеспечивают селективность их выщелачивания [6].

Способ прокаливания с “закалкой” в воде заключается в том, что термические напряжения разрушают кристаллы, вызывают образование дефектов и сколы по плоскостям спайности, что облегчает последующее измельчение с освобождением зерен ценного компонента. Термический способ активирования можно оценить как весьма действенный, поскольку он приводит к значительному

изменению не только химического, но и фазового состава обрабатываемого материала.

Целью работы является увеличение реакционной способности сульфидных концентратов меди методом интенсификации дальнейших гидрометаллургических процессов путем их термоактивации различными способами в присутствии $H_2SO_4+O_2$, $NaOH+NaNO_3$, $NaOH+NaCl$ и последующего выщелачивания меди в водной среде и в среде серной кислоты.

1. Методика проведения эксперимента. Выбраны оптимальные условия термической активации и выщелачивания для обеспечения максимального выхода меди в раствор. Химический состав выбранного для изучения концентрата, %: Cu - 18,00; Fe - 35,00; S - 32,00; Ca - 1,07; Mg - 0,90; Si - 3,27; C - 0,69; O₂ - 2,6; остальное - 6,47; минералогический состав, %: $CuFeS_2$ - 36,30; Cu_2S - 6,75; FeS_2 - 34,00; Fe_2O_3 - 10,55; $CaCO_3$ - 2,50; $MgCO_3$ - 2,70; SiO_2 - 7,00, остальное - 0,20. Содержание золота и серебра в концентрате: 50 г/т Au, 70 г/т Ag.

Обжиг концентрата проводили в лабораторной муфельной печи СНОЛ 20/12 с максимальной температурой нагрева 1000 °С. Печь нагревали до заданной температуры, взвешивали определенное количество концентрата, засыпали в корундовые тигли и ставили в муфельную печь. Этот момент считали началом обжига. После обжига огарок охлаждали до комнатной температуры и взвешивали.

Порядок проведения опытов выщелачивания был следующим: готовили раствор заданного состава и объема, включали мешалку, взвешивали необходимое для данного опыта количество медного концентрата, которое загружали в реактор. Этот момент считали началом опыта. На стенке стакана отмечали уровень пульпы в условиях перемешивания. В течение эксперимента добавляли воду для поддержания заданного отношения Т:Ж. По окончании опыта пульпу отфильтровывали с помощью вакуум-насоса, кек тщательно промывали до полного обесцвечивания промвод, высушивали в сушильном шкафу до постоянной массы при температуре 120 °С, взвешивали и анализировали на медь и железо [6]. Растворы после выщелачивания анализировали на медь.

Рентгенофазовое исследование проводили с помощью рентгенографа марки “ДРОН-3,0” с использованием $CuK\alpha$ -излучения и никелевого фильтра в следующем режиме: напряжение - 25 кВ, сила тока - 10 мА, скорость записи - 420 мм·ч⁻¹. Составы полученных фаз подвергались также химическому анализу.

2. Термодинамический анализ реакций процессов. Процессы обжига и дальнейшего выщелачивания дробленого концентрата являются весьма сложными. В них возможно одновременное протекание как параллельных, так и последовательных реакций. Критерием самопроизвольности протекания этих реакций при постоянных давлениях и температурах является убыль энергии Гиббса (ΔG_T^0). Для ориентировочной оценки возможности протекания той или иной

реакции по предлагаемой технологии переработки дробонского концентрата проведены термодинамические исследования [7,8]. Термодинамические расчеты выполнены на основании уравнения Гиббса-Гельмгольца: $\Delta G_T^0 = \Delta H_T^0 - T\Delta S_T^0$, где ΔH_T^0 - энтальпия, кДж/моль; ΔS_T^0 - энтропия, Дж/моль; T - температура, К. Расчеты проводили без интегральных поправок на изменение теплоёмкости веществ. Результаты расчетов представлены в виде графиков (рис. 1).

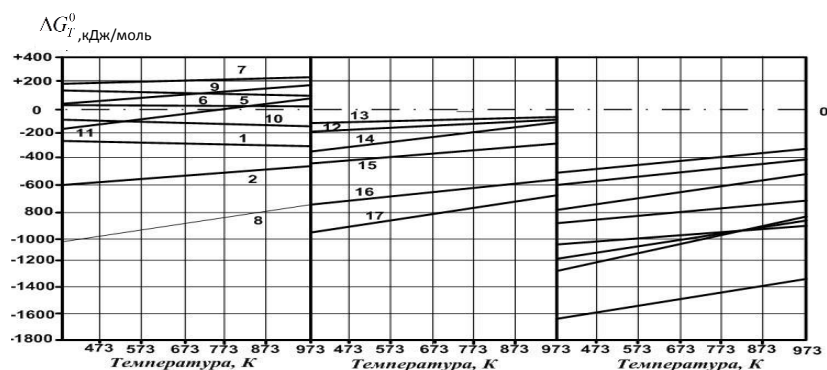


Рис. 1. Зависимость значения убыли свободной энергии Гиббса от температуры для реакций 1...25

- | | |
|--|--|
| 1. $\text{CuS} + 2\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{O}_2 = \text{CuSO}_4 + \text{SO}_2 + 2\text{H}_2\text{O};$ | 13. $\text{FeS}_2 + 6\text{NaNO}_3 = 6\text{NaNO}_2 + \text{FeSO}_4 + \text{SO}_2;$ |
| 2. $\text{Cu}_2\text{S} + 2\text{H}_2\text{SO}_4 + 2\text{O}_2 = 2\text{CuSO}_4 + \text{SO}_2 + 2\text{H}_2\text{O};$ | 14. $\text{CuFeS}_2 + 8\text{NaNO}_3 = \text{CuSO}_4 + \text{FeSO}_4 + 8\text{NaNO}_2;$ |
| 3. $\text{CuFeS}_2 + 5\text{H}_2\text{SO}_4 + 7/2 \text{O}_2 = 2\text{CuSO}_4 + \text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 + \text{SO}_2 + 5\text{H}_2\text{O};$ | 15. $\text{CuS} + 4\text{NaNO}_3 + 2\text{NaOH} = \text{Cu}(\text{OH})_2 + \text{Na}_2\text{SO}_4 + 4\text{NaNO}_2;$ |
| 4. $2\text{FeS}_2 + 3\text{H}_2\text{SO}_4 + 11/2 \text{O}_2 = \text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 + 4\text{SO}_2 + 3\text{H}_2\text{O};$ | 16. $\text{FeS}_2 + 6\text{NaNO}_3 + 2\text{NaOH} = \text{Fe}(\text{OH})_2 + \text{Na}_2\text{SO}_4 + 4\text{NaNO}_2 + \text{SO}_2;$ |
| 5. $\text{CuSO}_4 + 2\text{H}_2\text{O} = \text{Cu}(\text{OH})_2 + \text{H}_2\text{SO}_4;$ | 17. $\text{CuFeS}_2 + 8\text{NaNO}_3 + 4\text{NaOH} = \text{Cu}(\text{OH})_2 + \text{Fe}(\text{OH})_2 + 8\text{NaNO}_2 + 2\text{Na}_2\text{SO}_4;$ |
| 6. $\text{FeSO}_4 + 2\text{H}_2\text{O} = \text{Fe}(\text{OH})_2 + \text{H}_2\text{SO}_4;$ | 18. $\text{CuS} + 2\text{O}_2 + 2\text{NaOH} = \text{Cu}(\text{OH})_2 + \text{Na}_2\text{SO}_4;$ |
| 7. $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 + 6\text{H}_2\text{O} = 2\text{Fe}(\text{OH})_3 + 3\text{H}_2\text{SO}_4;$ | 19. $\text{Cu}_2\text{S} + 2\text{O}_2 + 2\text{NaOH} = 2\text{CuOH} + \text{Na}_2\text{SO}_4;$ |
| 8. $4\text{Fe}(\text{OH})_2 + \text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} = 4\text{Fe}(\text{OH})_3;$ | 20. $\text{FeS}_2 + 3\text{O}_2 + 2\text{NaOH} = \text{Fe}(\text{OH})_2 + \text{Na}_2\text{SO}_4 + \text{SO}_2;$ |
| 9. $4\text{CuOH} + \text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} = 4\text{Cu}(\text{OH})_2;$ | 21. $\text{CuFeS}_2 + 4\text{O}_2 + 4\text{NaOH} = \text{Fe}(\text{OH})_2 + \text{Cu}(\text{OH})_2 + 2\text{Na}_2\text{SO}_4;$ |
| 10. $\text{Cu}(\text{OH})_2 + \text{H}_2\text{SO}_4 = \text{CuSO}_4 + 2\text{H}_2\text{O};$ | 22. $\text{CuS} + 2\text{NaCl} + 2\text{O}_2 = \text{CuCl}_2 + \text{Na}_2\text{SO}_4;$ |
| 11. $2\text{Fe}(\text{OH})_3 + 3\text{H}_2\text{SO}_4 = \text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 + 6\text{H}_2\text{O};$ | 23. $\text{Cu}_2\text{S} + 2\text{NaCl} + 2\text{O}_2 = 2\text{CuCl}_2 + \text{Na}_2\text{SO}_4;$ |
| 12. $\text{CuS} + 4\text{NaNO}_3 = 4\text{NaNO}_2 + \text{CuSO}_4;$ | 24. $\text{CuFeS}_2 + 4\text{NaCl} + 4\text{O}_2 = \text{CuCl}_2 + \text{FeCl}_2 + 2\text{Na}_2\text{SO}_4;$ |
| | 25. $\text{FeS}_2 + 2\text{NaCl} + 3\text{O}_2 = \text{FeCl}_2 + \text{Na}_2\text{SO}_4 + \text{SO}_2.$ |

График состоит из трех частей. Показаны данные расчетов температурной зависимости ΔG_T^0 реакции окислительного обжига сульфидов меди и железа: в первой части - в присутствии серной кислоты (реакции 1...6) и реакции выщелачивания полученных продуктов обжига (реакции 7...11) от температуры; во второй части в присутствии NaNO_3 (реакции 12...14), а также смеси $\text{NaOH}+\text{NaNO}_3$ (реакции 15...17) от температуры; в третьей части - в присутствии NaOH (реакции 18...21), а также смеси $\text{NaOH}+\text{NaCl}$ (реакции 22...25).

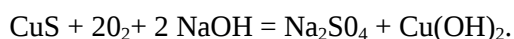
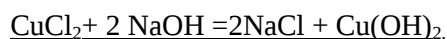
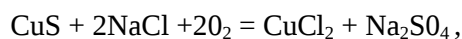
Как показывают значения ΔG_T^0 , для реакции обжигов сульфидов меди и железа в присутствии концентрированной H_2SO_4 и O_2 термодинамически вероятны и имеют наиболее отрицательное значение убыли энергии Гиббса (реакции 1...4). При этом с повышением температуры вероятность этих реакций уменьшается.

Реакции выщелачивания полученных сульфатов в водной среде почти не вероятны и имеют положительное значение убыли энергии Гиббса (реакции 5...7), несмотря на то, что растворимость сульфатов железа и меди в воде протекает хорошо при любых температурах. Кроме того, реакции гидролиза сопровождаются генерацией H_2SO_4 . Отметим, что с заметной вероятностью протекают реакции окисления $\text{Fe}(\text{OH})_2$ и CuOH до $\text{Cu}(\text{OH})_2$ и $\text{Fe}(\text{OH})_3$ (реакции 8,9). Вероятны также продукты окислительного обжига ($\text{Fe}(\text{OH})_3$, $\text{Cu}(\text{OH})_2$) при сернокислотном выщелачивании (реакции 10,11). Можно предположить, что суммарные реакции окислительного обжига и сернокислотного выщелачивания концентрата будут протекать с большой термодинамической вероятностью. При этом окислительный обжиг сульфидов меди и железа в присутствии H_2SO_4 сопровождается выделением SO_2 , что крайне нежелательно для этой технологии.

Суммарные реакции сульфатов меди и железа, полученных в результате окислительного обжига с сернокислотным выщелачиванием, аналогичны реакциям 1...4 и также термодинамически вероятны с отрицательным значением убыли энергии Гиббса (реакции 1...4). Оба процесса сопровождаются выделением SO_2 , что требует дальнейшей утилизации. Исходя из вышеизложенного, обсуждается термодинамическая вероятность реакции обжига сульфидов меди и железа с заменой кислорода другим окислителем - NaNO_3 (реакции 12...14). Эти реакции термодинамически вероятны и имеют значительное отрицательное значение убыли энергии Гиббса, особенно в присутствии NaOH (реакции 15...17). Но здесь также не решается вопрос утилизации сернистого газа, поэтому дальнейшее исследование проведено с применением окислительного обжига сульфидов меди и железа в присутствии NaOH .

Как видно из третьей части графика, все реакции обжига сульфидов в присутствии NaOH протекают с большой термодинамической вероятностью (реакции 18...21), поэтому обсуждалась термодинамическая вероятность протекания реакции окислительного хлорирующего обжига сульфидов меди и железа в присутствии NaCl (реакции 22...25).

Из хода кривых реакций 22...25 видно, что вероятность резко увеличивается. Можно полагать, что эти реакции с большой вероятностью могут протекать и в присутствии NaCl + NaOH, так как в этом случае реакции можно представить как сумму следующих реакций:



Если сравнить все случаи окислительного обжига и выщелачивания сульфидов меди и железа, то можно заметить, что наиболее предпочтительны реакции в присутствии NaOH + NaCl, вероятность протекания которых наивысшая (реакции 18...21), и в отличие от всех случаев, в этих реакциях исключается выделение нежелательного газа SO₂.

Результаты термодинамических расчетов нуждаются в экспериментальной проверке.

3. Экспериментальная часть. При исследовании химических реакций недостаточно использовать только термодинамический анализ, поскольку результаты его указывают лишь на вероятность протекания процесса. Необходимо изучить кинетику протекания процесса, определить его скорость и влияние на него ряда факторов, являющихся важными для выяснения путей интенсификации процесса, которые не всегда совпадают с выводами термодинамики.

Сульфиды цветных металлов, как правило, непосредственно не растворяются в неорганических кислотах, в частности, в серной кислоте. Для растворения сульфидов требуется наличие окислителей и различных веществ, способствующих повышению реакционной способности исходного концентрата. Поэтому в экспериментальных исследованиях все процессы термообработки проводились в присутствии окислителей.

Кинетические исследования проводились, в первую очередь, для экспериментальной проверки результатов термодинамических расчетов. Обсуждены различные варианты интенсификации процесса выщелачивания путем повышения реакционной способности дробонского концентрата термической активацией в присутствии H₂SO₄ + O₂ и смесей NaOH + NaNO₃ и NaOH + NaCl с дальнейшим выщелачиванием в каждом случае активированного концентрата в водной среде и в среде серной кислоты.

Расход серной кислоты принимали с учетом связывания в сульфаты извлекаемых цветных металлов (Cu+Fe). Навеску концентрата во всех опытах брали 10 г.

3.1. Обжиг с серной кислотой (выщелачивание концентрата после сульфатизации). Цель данной серии опытов - проверить возможность использования сульфатирующего обжига для дробонского концентрата при термической

активации его путем окислительного обжига непосредственно с концентрированной H_2SO_4 . Расход концентрированной H_2SO_4 на 10 г концентрата составил 6,02 г, или 3,27 мл (это соответствует стехиометрическому расходу на взаимодействие с основными компонентами с образованием сульфатов). Навеску концентрата, смоченного кислотой, загружали в тигель, обжигали при 100 и 350 °C в течение 2-х или 4-х часов в присутствии кислорода воздуха, а продукт сульфатизации выщелачивали водой при Т:Ж=1:5, $\tau = 100$ °C 1 ч. Из полученных данных видно (рис. 2), что сульфатизация концентрата при 250 °C в стехиометрическом расходе кислоты в течение 4 ч обеспечивает извлечение меди при последующем выщелачивании спёка водой более 61,60%.

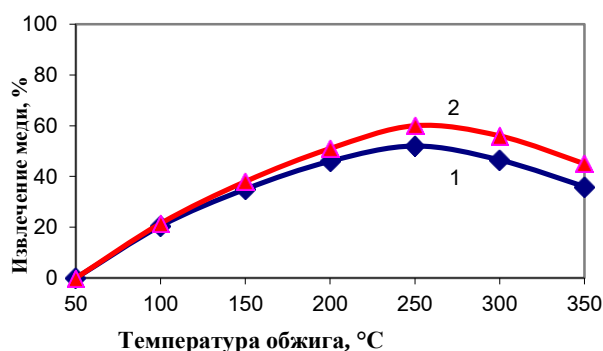


Рис. 2. Зависимость извлечения меди от температуры обжига в присутствии кислорода воздуха и выщелачивания продукта водой при Т:Ж=1:5, $t=100$ °C $\tau = 1$ ч:
1 - расход кислоты по стехиометрии, 2 - 20% избыток от стехиометрии

Возможно, такой вариант при соответствующей детальной проработке может обеспечить и большее извлечение меди в раствор, что вытекает также из термодинамических расчетов (рис.1, реакции 1...4), но проблема утилизации сернистых газов остаётся. Поэтому были проверены другие варианты обжига, исключающие выделение сернистых газов в атмосферу.

3.2. Предварительный окислительный обжиг концентрата с последующим сернокислотным выщелачиванием. Концентрат обжигали в муфельной печи, в алундовых тиглях, в присутствии кислорода воздуха, при температурах 200...600 °C при разных продолжительностях. Продукты обжига выщелачивали водным раствором серной кислоты при Т:Ж=1:4, $t=70$ °C в течение 1,5...3 ч. Суммарные реакции обжига и сернокислотного выщелачивания представлены также реакциями 1...4 (рис. 1). Результаты приведены на рис. 3.

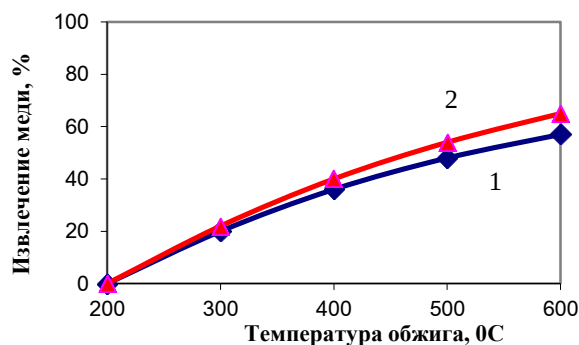


Рис. 3. Зависимость извлечения меди от температуры окислительного обжига концентрата с последующим сернокислотным выщелачиванием
1 - $C H_2SO_4 = 150$ г/л; 2- $C H_2SO_4 = 300$ г/л

Из приведённых результатов видно, что предварительный окислительный обжиг концентрата улучшает показатели выщелачивания, но извлечение не превышает 62,4%. Кроме того, в ходе экспериментов наблюдалось значительное выделение SO_2 , что противоречит поставленной в работе цели.

В этих условиях при выщелачивании сульфидных концентратов благородные металлы концентрируются в нерастворимом остатке - кеке от выщелачивания. Для их переработки используют традиционные технологии, например, цианирование с последующей сорбцией золота из пульпы и выделением металла из десорбатов электролизом.

Термодинамические расчеты показали, что выщелачивание в водном режиме (реакции 5...9) не дало положительных результатов, поэтому оно здесь не обсуждалось. В связи с этим были проверены другие варианты обжига, исключаящие выделение сернистых газов в атмосферу.

3.3. Обжиг концентрата с $NaNO_3$. Концентрат обжигали в муфельной печи при таких же условиях, но кислород заменили $NaNO_3$ в стехиометрическом количестве (2,54 г). Продукты обжига выщелачивали водным раствором серной кислоты при Т:Ж=1:4, $t=70$ °C в течение 1,5...7 ч. В ходе окислительного обжига возможны реакции 12...14 (рис. 1). В аналогичных условиях извлечение меди увеличивается, но не превышает 74,5%.

3.4. Обжиг концентрата с $NaOH+NaNO_3$. Пробы концентратов (10 г) тщательно перемешивали смесью 3,8 г сухой щёлочи и 2,54 г $NaNO_3$ (по стехиометрическому расходу) и обжигали в муфельной печи. Далее проводили выщелачивание водой и 2 н. водным раствором серной кислоты при Т:Ж = 1:5, $t= 100$ °C, $\tau_{выщ} = 1$ ч. В этих условиях извлечение меди заметно увеличивается и достигает 76% при продолжительности выщелачивания 3 ч. Это вытекает и из термодинамических расчетов (рис. 1, реакции 15...17). Но в данном случае также не исключается выделение газа SO_2 и H_2S .

3.5. Окислительный обжиг концентрата с NaOH. Пробу концентрата (10 г) тщательно перемешивали 3,8 г сухой щёлочи (по стехиометрическому расходу) и обжигали в муфельной печи. Далее проводили выщелачивание водой и 2 н. водным раствором серной кислоты при Т:Ж = 1:5, $t = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\tau_{\text{выщ}} = 1\text{ ч}$. Реакции протекают по уравнениям 18...21 (рис. 1). Как показали термодинамические расчеты, извлечение меди увеличивается и достигает 80,30%, но не исключается и наличие SO_2 в отходящих газах.

Проблему переработки дробонского сульфидного медного концентрата, исключаяющего выделение в атмосферу вредных газов, можно решить путём предварительного хлорирующего обжига с NaCl.

3.6. Обжиг концентрата с NaCl (вариант I). Обжиг проводили с NaCl в соотношении по массе 2:1 по концентрату в муфельной печи при различных температурах в течение одного часа. После обжига огарок выщелачивали водой при Т:Ж = 1:5, $t = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\tau = 1\text{ ч}$, а пульпу фильтровали. Фильтрат нейтрализовывали до pH = 6...7 с добавлением NaOH в присутствии метилоранжа. Выпавший осадок сине-зелёного цвета сушили при температуре 100...110 $^{\circ}\text{C}$. В маточном растворе медь не обнаружена. Фазовый и химический анализы показали, что он представляет собой гидратированный хлорид меди – $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.

Вторая серия опытов осуществлялась так же, как и первая, но огарок после сушки выщелачивали не водой, а серной кислотой при Т:Ж = 1:5, $t = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\tau = 1\text{ ч}$. Результаты приведены на рис.4 (реакции 22...25). Интересно отметить, что наибольшее извлечение меди в раствор достигается после обжига концентрата с хлоридом натрия при 450 $^{\circ}\text{C}$ и мало зависит от концентрации кислоты и температуры выщелачивания.

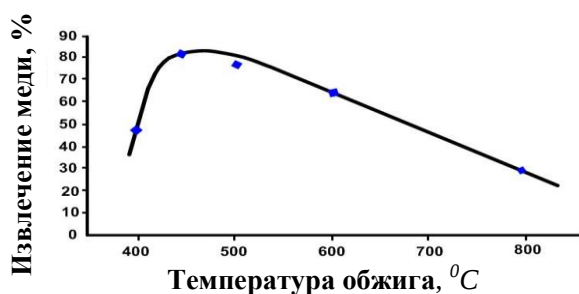


Рис. 4. Зависимость извлечения меди в раствор при выщелачивании огарка серной кислотой (40 г/л) от температуры обжига с NaCl ($\tau_{\text{обж}}=2\text{ ч}$, $\tau_{\text{выщ}}=2\text{ ч}$)

Существенное значение имеет длительность обжига и выщелачивания.

3.7. Обжиг концентрата с NaCl (вариант II). В муфельной печи обжигали концентрат с соотношением NaCl по массе 2:1 при различных температурах в течение одного часа. После обжига огарок выщелачивали водой при Т:Ж = 1:8,

$t = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\tau = 1$ и 2 ч, а пульпу фильтровали. Фильтрат нейтрализовывали до $\text{pH} = 6 \dots 7$ с добавлением NaOH в присутствии метилоранжа. Выпадал осадок синезелёного цвета, а маточный раствор приобрел жёлтый цвет. Осадок сушили при температуре $100 \dots 110\text{ }^{\circ}\text{C}$. В маточном растворе медь не обнаружена. Фазовый и химический анализы показали, что осадок представляет собой гидратированный хлорид меди – $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.

Вторая серия опытов осуществлялась так же, как и первая, но огарок после сушки выщелачивали не водой, а серной кислотой при $\text{T}:\text{Ж} = 1:8$, $t = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\tau = 1$ ч и концентрации 60 г/л . На рис. 5 показана зависимость извлечения меди в раствор от продолжительности выщелачивания.

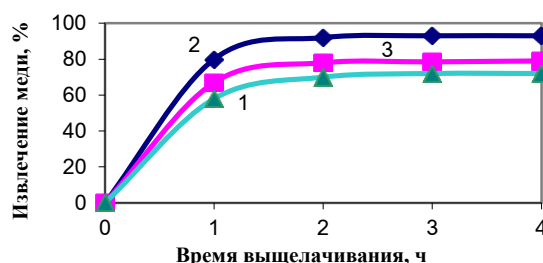


Рис. 5. Зависимость извлечения меди от продолжительности выщелачивания:
 1 – $t_{\text{обж}} = 400\text{ }^{\circ}\text{C}$; 2 – $t_{\text{обж}} = 450\text{ }^{\circ}\text{C}$; 3 – $t_{\text{обж}} = 500\text{ }^{\circ}\text{C}$

Оптимальной следует считать длительность обжига 1 ч и выщелачивания – 2 ч, когда извлечение меди в раствор превышает 94,5%.

Полученный кек после выщелачивания подвергали минералогическому анализу (табл.). Основными минералами в пробе являются гематит и кварц. В самых лучших экспериментах содержание меди в кеках составляло менее 1%, а железа – около 50%.

Таблица

Фазовый состав кека выщелачивания

Минеральная фаза	Химическая формула	% (об)	% (по массе)
Гематит	Fe_2O_3	74,10	85,00
Кварц	SiO_2	25,90	15,00
Итого		100	100

Таким образом, максимальное извлечение меди в раствор достигается при обжиге концентрата в присутствии хлорида натрия при $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ и выщелачивании продукта обжига серной кислотой при концентрации 60 г/л в течение 1 ч – 83%, а в течение 2 часов – 94,5%.

4. Обсуждение результатов. Обработка концентрата концентрированной H_2SO_4 при $200 \dots 250\text{ }^{\circ}\text{C}$ в пробных опытах дала извлечение меди в раствор ~60%.

Такая обработка хотя и перспективна при оптимизации технологических параметров, но ведёт к выделению в атмосферу сернистого газа, например, по реакции: $\text{CuS} + \text{H}_2\text{SO}_4 + \text{O}_2 = \text{CuSO}_4 + \text{SO}_2$, что неприемлемо для дрмбонского концентрата. Это, собственно, и предопределило поиск технологий, исключающих загрязнение атмосферы сернистыми газами.

Проблему переработки дрмбонского сульфидного медного концентрата, исключаяющего выделение в атмосферу SO_2 , как показали наши исследования, можно решить путём предварительного хлорирующего обжига с NaCl . Такой вариант не новый и может осуществляться в простейшем пирометаллургическом оборудовании. Новым является то, что этот способ подготовки сульфидного сырья к выщелачиванию впервые был применён к дрмбонскому концентрату. Нами показано, что при оптимальных режимах можно достичь извлечения меди в раствор не ниже 95%.

Таким образом, при обжиге концентрата в присутствии NaCl получаются CuCl_2 , FeCl_2 и Na_2SO_4 :

Заключение. Необходимо отметить, что сульфидный концентрат Дрмбонского месторождения – чрезвычайно трудный объект для гидрометаллургической технологии. Как показали исследования, традиционно используемые приёмы интенсификации сернокислотного разложения при температурах до 100 °С для него малоэффективны. Для переработки такого типа сырья перспективно сочетание пиро- и гидрометаллургических процессов, в частности, хлорирующего обжига с последующим сернокислотным выщелачиванием полученного продукта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Григорян Г., Абрамян А., Мирзоян В. Основные характеристики медь-золото сульфидных руд Армении (Личкваз) и Арцаха (Дрмбон) // Ученые записки АргУ.- 2004.- №1(8).- С. 30-31.
2. Технологическая минералогия / Г.А. Сидоренко и др. – М.: Металлургия, 1992. - 233 с.
3. Набойченко С.С. Гидрометаллургия меди. - М.: Металлургия, 1974.- 254 с.
4. Герлах Я.К., Гокк Е.Д., Гош Ш.К. Активация и выщелачивание халькопиритных концентратов разбавленным раствором серной кислоты. - М.: Металлургия, 1978.- 186 с.
5. Гучетль И.С., Друкер Е.Я., Барышников И.Ф. Переработка упорных золотосодержащих руд и концентратов.- М.: Цветметинформация, 1972.- 60 с.
6. Dewhirst R.F., Moulton S.P., Coetzee J.A. Intensive cyanidation for the recovery of coarse gold // J.S. Afr / Inst. Mining and Met.- 1984.- 84, № 6. - P. 159-163.
7. Каковский И.А., Набойченко С.С. Термодинамика и кинетика гидрометаллургических процессов.- Алма-Ата: Наука, Казахское отделение, 1986.- 268 с.
8. Кубашевский О., Оллок С. Металлургическая термехимия. - М.: Металлургия, 1982.- 392 с.

ГИУА (ПОЛИТЕХНИК). Материал поступил в редакцию 10.02.2014.

**Վ.Հ. ՄԱՐՏԻՐՈՍՅԱՆ, Զ.Վ. ՄԱՐԳՍՅԱՆ, Մ.Է. ՍԱՍՈՒՆՅԱՆ, ՅՈՒ. Օ. ԼԻՍՈՎՍԿԱՅԱ
ԶԵՐՄԱՍՇԱԿՈՒՄԸ ԴՐՄԲՈՆԻ ՈՍԿԻ - ՊՂՆՁԱՅԻՆ ՍՈՒԼՖԻԴԱՅԻՆ ԽՏԱՆՑՈՒԹԻ
ԾՇՄԲԱԹՔՎԱՅԻՆ ՏԱՐԴԱԼՈՒԾՄԱՆ ԳՈՐԾԸՆԹԱՑՈՒՄ**

Քննարկվել է ջերմային ակտիվացման (թրծման) մեթոդի կիրառման հնարավորությունը՝ որպես Դրմբոնի ոսկի-պղնձային խտանյութերի հետագա ծծմբաթթվային տարրալուծման գործընթացի ինտենսիվացման արդյունավետ եղանակ: Ընտրվել են օպտիմալ պարամետրեր՝ խտանյութի նախնական ջերմաքիմիական ակտիվացման եղանակով տարրալուծման գործընթացում լուծույթում պղնձի առավելագույն ելք ապահովելու համար:

Առանցքային բառեր. ջերմամշակում, Դրմբոնի ոսկի-պղնձային սուլֆիդային խտանյութ, ծծմբաթթվային տարրալուծում, պղինձ, ոսկի:

**V.H. MARTIROSYAN, K.V. SARGSYAN, M.E. SASUNTSYAN, YU.O. LISOVSKAYA
HEAT TREATMENT OF THE DRMBON GOLD-COPPER SULPHIDIC
CONCENTRATE AT SULPHURIC ACID LEACHING**

The processing possibility of the Drmbon gold-copper sulphidic concentrate by the method of heat treatment (roasting) for the purpose of a further intensification of the sulphuric acid leaching processes is investigated. The optimum conditions of heat treatment and leaching for providing the maximum extraction of copper into the solution are selected.

Keywords: heat treatment, Drmbon copper and sulphidic concentrate, sulphuric acid leaching, copper, gold.

ՀՏԴ 004.7

ՀԱՇՎՈՂԱԿԱՆ ՏԵԽՆԻԿԱ ԵՎ
ԻՆՖՈՐՄԱՏԻԿԱ

Ս.Ա. ՄԻՐԱԴԵՂՅԱՆ, Ռ.Գ. ԿԻՐԱԿՈՍՅԱՆ

**ՄԱՍՆԱԳԻՏԱՑՎԱԾ ՔՈՍՓՅՈՒԹԵՐԱՑԻՆ ՑԱՆՑԵՐԻ ԿԱՌՈՒՑՎԱԾՔԻ
ՆԱԽԱԳԾՄԱՆ ԱՎՏՈՄԱՏԱՑՎԱԾ ԳՈՐԾԻՔԱՑԻՆ ՄԻՋՈՑԻ ՄՇԱԿՈՒՄԸ**

Մշակվել է մասնագիտացված քումփյութերային ցանցերի կառուցվածքի նախագծման ավտոմատացված գործիքային միջոց: Այն թույլ է տալիս խնայել ցանցի կառուցվածքի նախագծման տարբեր սցենարների համար անհրաժեշտ ժամանակը և նախորդ փորձերի արդյունքի հիման վրա ստանալ քումփյութերային ցանցի արդյունավետ կառուցվածք: Մշակված գործիքային միջոցը փորձարկվել է Հայաստանի առողջապահության ազգային ինստիտուտի հեռաբժշկության քումփյութերային ցանցի կառուցվածքի առաջարկը մշակելիս:

Առանցքային բառեր. վեբ ծրագրեր, մասնագիտացված ցանցեր, սիմուլյատոր, ցանցի նախագծում, շարժական ծրագրավորում, հեռաբժշկություն:

Ներածություն: Շարժական սարքավորումների (պլանշետներ, սմարտֆոններ և այլն) շուկան օր օրի մեծանում է, և առավել տարածված շարժական հարթակները՝ iOS, Android, Window RT/8/8.1 և Windows Phone, ունեն միմյանցից բավականին տարբերվող կիրառական ծրագրերի ինտերֆեյս (ԿՕԻ) և սահմանափակ ֆունկցիոնալություն [1]: Դա թույլ չի տալիս գոյություն ունեցող ցանցային սիմուլյատորները արդյունավետ տեղափոխել արագ աճող շարժական սարքերի շուկա: Բազմահարթակության այս խնդիրը լուծելու եղանակներից մեկը բոլոր հիմնական հարթակներում նույնական ստանդարտների և տեխնոլոգիաների կիրառումն է:

Ինտերնետի արագության մեծացումը և ամպային հաշվարկների հսկայական պոտենցիալը թույլ են տալիս ստեղծել ծրագրային համակարգեր, որոնք կարող են օգտագործվել բոլոր այն սարքավորումներում, որոնք մուտք ունեն դեպի ինտերնետ և ունեն վեբ-դիտարկիչ՝ անկախ ապարատային հագեցածությունից և հարթակից, որի վրա այն հիմնված է [2]:

Սարքավորումների ապարատային մասի և ամպային տեխնոլոգիաների համադրումն արդեն իսկ հաջողությամբ օգտագործվում է տարբեր ոլորտներում [3]: Սակայն բազմաթիվ տարածված ծրագրային համակարգեր հասանելի են միայն քումփյութերների դեպքում և աշխատում են մի քանի հիմնական օպերացիոն հարթակներով՝ Windows, Linux, MacOSX և այլն: Համեմատաբար թույլ հաշվողական հզորությունը և փոքր ԿՕԻ-ն թույլ չեն տալիս այդ ծրագրերը տեղափոխել շարժական հարթակներ: Ցանցային սիմուլյատորներն այս կարգի ծրագրերից են:

Խնդրի դրվածքը: Արդիական է արդեն իսկ գոյություն ունեցող, արդյունավետ աշխատող և լայնորեն տարածված ցանցային սիմուլյատորների վրա հիմնված ամ-

պային տեխնոլոգիաների առավելություններից օգտվող և վեբ ստանդարտների հետ համատեղելի մասնագիտացված քոմփյութերային ցանցերի կառուցվածքի նախագծման ավտոմատացված գործիքային միջոցի մշակումը:

Նախագծվող գործիքային միջոցը պետք է.

- լինի երկոխասային տիպի համակարգ,
- կարողանա աշխատել բաց կոդով տարածվող ժամանակակից ցանցային սիմուլյատորների հետ,
- լինի համատեղելի վեբ-ստանդարտներին,
- կարողանա հավաքագրել և մշակել ավարտված սիմուլյացիաների արդյունքները,
- ցանցի արդյունավետ կառուցվածքի մշակման համար օգտագործի նախորդ սիմուլյացիաների արդյունքները:

Ցանցային սիմուլյատորների աշխատանքն ամպային հարթակում: Քոմփյութերային ցանցային սիմուլյատորների տեղադրումը ժամանակատար և բավականին բարդ գործընթաց է: Սերվերային համակարգերի վրա դրա տեղադրումը թույլ կտա խնայել տեղադրման և կարգաբերման վրա ծախսվող ժամանակը: Համեմատաբար մեծ հաշվողական հզորության հաշվին սերվերի վրա աշխատող ցանցային սիմուլյատորն ավելի քիչ ժամանակում կկատարի իր առջև դրված խնդիրը: Ժամանակակից ցանցային սիմուլյատորները կարող են իրականացնել զուգահեռ հաշվարկներ, ինչն ավելի արդյունավետ է իրականացվում բազմապրոցեսորային համակարգերի վրա [4]:

Հաշվողական ռեսուրսների արդյունավետ օգտագործման համար ամեն մի ցանցային սիմուլյատորից միաժամանակ կարող են օգտվել մի քանի օգտագործողներ: Վեբ մակարդակի ավելացման շնորհիվ այն հասանելի է դառնում համացանց մուտք ունեցող և վեբ ստանդարտներին համատեղելի սարք ունեցող բոլոր օգտվողներին:

Ցանցային սիմուլյատորների կիրառումը և առկա խնդիրները: Մասնագիտացված քոմփյութերային ցանցերը, որպես կանոն, ունեն բարդ ճարտարապետություն, և նրանց կառուցվածքի նախագծումը կամ փոփոխումն ավելի հեշտ է իրականացնել ցանցային սիմուլյատորների միջոցով: Տարածված ցանցային սիմուլյատորներից շատերը նախատեսված են Linux կամ Windows օպերացիոն համակարգերի վրա աշխատելու համար: Շատ ընկերություններ տրամադրում են այդ ՕՏ-երով աշխատող ամպային ռեսուրսներ: Դա թույլ է տալիս գոյություն ունեցող ցանցային սիմուլյատորներն աշխատեցնել ամպային հարթակների վրա: Ամպային հարթակը թույլ է տալիս հեռակա կարգով իրականացնել սիմուլյացիա և հաշվողական ռեսուրսների անբավարարության դեպքում արագորեն ավելացնել դրանք, իսկ ավելցուկի դեպքում անցնել ավելի թույլ ապարատային մասի՝ խնայելով ֆինանսական միջոցներ:

Ամպերի վրա ցանցային սիմուլյատորների տեղադրումը դեռևս չի ապահովում դրանց հասանելիությունը շարժական սարքավորումների վրա: Անհրաժեշտություն է առաջանում ավելացնել լրացուցիչ վեբ մակարդակ:

Ցանցային սիմուլյատորների օգտագործման օրինակ կարող է դիտվել առողջապահական ոլորտը, մասնավորապես՝ հեռաբժշկությունը: Հեռաբժշկության համար նախատեսված կամ մշակվող քոմփյուտերային ցանցերում կարող են կիրառվել բազմապիսի ապարատաձրագրային լուծումներ: Նման մասնագիտացված ցանցերում վիդեո և աուդիո թրաֆիկները քոմփյուտերային ցանցում կարող են առաջացնել ծանրաբեռնվածություն և, որպես հետևանք, փոխանցվող պատկերի և ձայնի աղավաղում: Այդ պատճառով վիդեոկոնֆերանսների համար նախատեսված սարքավորումներ արտադրող ընկերություններն իրականացնում են աուդիո և վիդեո պատկերների սեղմում և մասնագիտացված քոմփյուտերային ցանցներով ուղարկում արդեն սեղմված տեղեկություն: Դա թույլ է տալիս նվազեցնել մասնագիտացված քոմփյուտերային ցանցերի հանգույցների ծանրաբեռնվածությունը [5]: Տեղեկության սեղմումը կարող է իրականացվել ինչպես ապարատային, այնպես էլ ծրագրային եղանակով: Որոշ ընկերություններ տեղեկության սեղմման համար կիրառում են իրենց մշակված ալգորիթմները: Դա ստիպում է մյուս մասնակիցներին՝ օգտվելու նույն ընկերության սարքավորումներից: Մի շարք ընկերություններ, ինչպիսիք են՝ Tandberg-ը, Plycom-ը, Cisco-ն և D-Link-ը, առաջարկում են հեռաբժշկության ոլորտում կիրառվող լուծումներ: Այս ընկերությունների կողմից առաջարկվող որոշ սարքավորումներ, որոնք հաջողությամբ կիրառվում են հեռաբժշկական խնդիրների լուծման համար, բերված են նկ. 1-ում:



Նկ. 1. Վիդեոկոնֆերանսների համար նախատեսված սարքավորումներ

Ցանցային սիմուլյատորների միջոցով կարելի է փոփոխել փոխանցվող թրաֆիկի բնութագրերը, որոնք կհամապատասխանեն սարքավորումներից յուրաքանչյուրի կողմից գեներացվածին: Վիդեոպատկերների համար կարող են օգտագործվել VGA, HD, FullHD, 4K և այլ թույլատրելիությամբ պատկերներ՝ կախված վիդեոկոնֆերանսի սարքավորումների տեսախցիկի կարողությունից և քոմփյուտերային ցանցի թողունակությունից: Ուղեկցվող ձայնը կարող է լինել HD որակի: Միմուլյացիայի արդյունքում ստացված տեղեկության հիման վրա և հաշվի առնելով ֆինանսական հնարավորությունները՝ կարելի է ընտրել սարքավորումները:

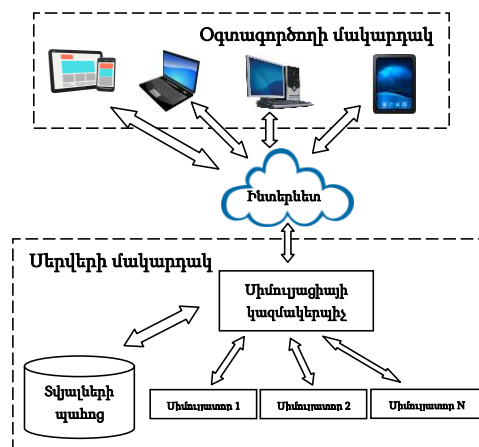
Քոմփյուտերային ցանցերի կառուցվածքի նախագծման գործիքային միջոց: Մինևույն կառուցվածքով մասնագիտացված քոմփյուտերային ցանցը կարելի է փոր-

ձարկել տարաբնույթ թրաֆիկի պայմաններում, փոփոխել թրաֆիկի ինտենսիվությունը, կիրառել ցանցի հանգույցների միացման տարբեր տեխնոլոգիաներ և այլն: Այս ամենը թույլ է տալիս գնահատել մասնագիտացված քոմփյուտերային ցանցի հուսալիությունը, հայտնաբերել թույլ կետերը, դիտարկել կատարելագործման տարբեր եղանակներ՝ առանց իրական քոմփյուտերային ցանցի հետ աշխատելու, և, որպես արդյունք, չկատարել լրացուցիչ ֆինանսական ներդրում:

Սիմուլյացիայի ավարտին կուտակվում է մեծ քանակությամբ տեղեկույթ, որը մշակելու դեպքում հնարավոր է օգտագործել մեկ այլ սցենարի կամ մասնագիտացված քոմփյուտերային ցանցի կառուցվածքի նախագծման համար՝ առանց դիմելու սիմուլյացիային: Մակայն դա չի արվում, և այդ շատ արժեքավոր տվյալները չեն օգտագործվում հետագայում նախագծվող քոմփյուտերային ցանցերի համար:

Նման սկզբունքով աշխատող ավտոմատացված համակարգերը կարող են լինել ինքնուսուցանվող, և որքան շատ թրաֆիկի տեսակների և մասնագիտացված քոմփյուտերային ցանցի կառուցվածքների համար կատարվի սիմուլյացիա, այնքան ավելի ճշգրիտ խորհուրդ կտա մշակվող գործիքային համակարգը: Այսօր տարածում ստացած ցանցային սիմուլյատորները նման հնարավորություն չունեն:

Նման երխոսային ավտոմատացված համակարգի մշակման համար առաջարկվում է նկ. 2-ում բերված կառուցվածքը:



Նկ. 2. Տարաբնույթ թրաֆիկի պայմաններում ցանցի կառուցվածքի նախագծման գործիքային միջոց

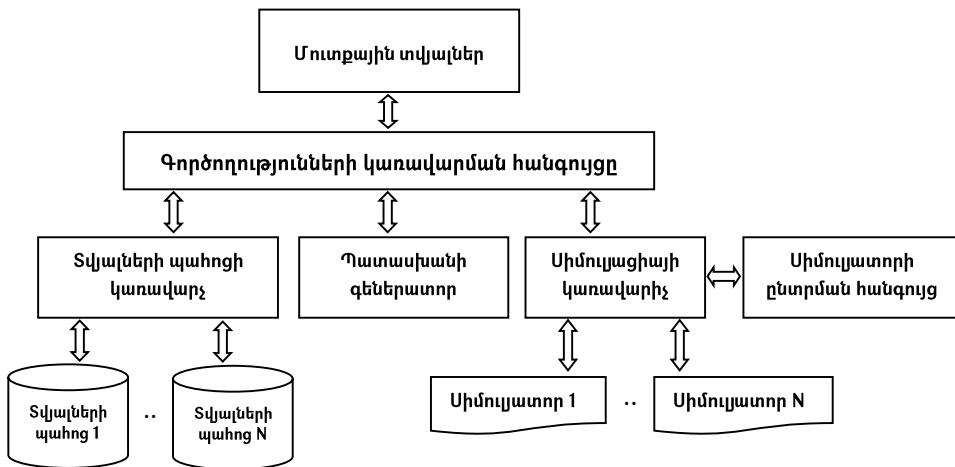
Նախագծված ավտոմատացված գործիքային միջոցը բաղկացած է երկու մակարդակից՝ **օգտագործողի մակարդակ** և **սերվերային մակարդակ**:

Օգտագործողի մակարդակում կիրառվում է վեբ-ստանդարտների հիման վրա մշակված ծրագիրը կամ կայքը, որը հնարավոր է օգտագործել պլանշետներում, սմարտֆոններում, նոթբուքերում և այլ սարքավորումներում: Ծրագիրը թույլ է տա-

լիս օգտագործողին ստեղծել սիմուլյացիա, կատարել անհրաժեշտ կարգավորումները և հրամանները: Ինտերնետի միջոցով այն կապ է հաստատում սերվերային մակարդակի հետ:

Սերվերային մակարդակը ներկայացնում է ամպային տեխնոլոգիաների վրա հիմնված ավտոմատացված համակարգ: Այն ապահովում է օգտագործողի և սիմուլյատորի միջև երկխոսությունը: Սերվերային մակարդակը բաղկացած է մի քանի հիմնական մասերից, որոնք ապահովում են առանձին հանգույցների, ինչպիսիք են՝ տվյալների պահոցը, սիմուլյացիոն մոդուլը, ցանցի կառուցվածքի լավարկան մոդուլը և այլն, զուգահեռ աշխատանքը:

Սերվերային մակարդակի ընդհանուր մշակված կառուցվածքը բերված է նկ. 3-ում:



Նկ. 3. Ցանցի կառուցվածքի նախագծման գործիքային միջոցի սերվերային մասի կառուցվածքը

Գործողությունների կառավարման հանգույցը (ԳԿՀ) կարևոր դեր է կատարում ավտոմատացված համակարգի աշխատանքում և ապահովում է օգտագործողի հետ երկխոսությունը: Այն ստանում է մուտքային տվյալները, որոնք կարող են լինել սիմուլյացիոն փաթեթ ստեղծելու, սիմուլյացիան ընդհատելու, պարամետրերի փոփոխության և այլ հրամաններ, մշակում դրանք և որոշում հաջորդ քայլը: Մուտքային տվյալները կարելի է ներկայացնել I բազմությամբ:

$$I = \{N, S, C\}, \quad (1)$$

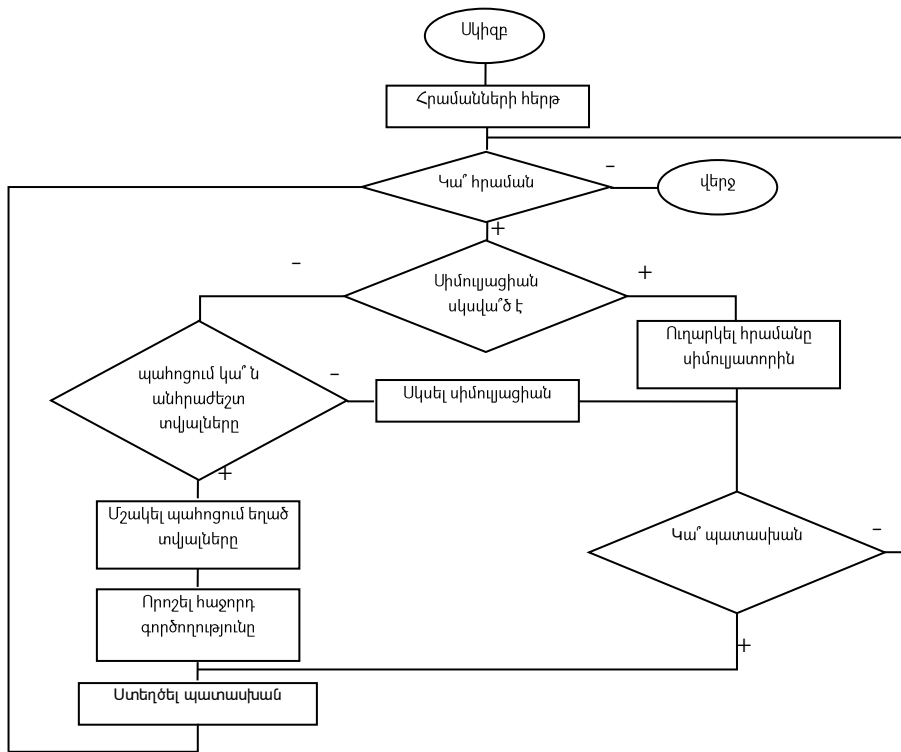
որտեղ N -ը մուտքային ցանցի կառուցվածքն է, S -ը՝ կարգավորումները, C -ն՝ հրամանները:

Եթե ստացվել է նոր սիմուլյացիոն փաթեթ ստեղծելու հրաման, ապա ԳԿՀ-ն տվյալների պահոցում փնտրում է նման կառուցվածքով այլ ցանցերի սիմուլյացիայի արդյունքներ: Դա արվում է տվյալների պահոցի կառավարիչի (ՏՊԿ) միջոցով: Այն,

ստանալով ցանցի պարամետրերը, դիմում է բազային և փորձում գտնել նմանատիպ տվյալներով այլ սիմուլյացիաների արդյունքում ստացված կառուցվածքներից առավել արդյունավետները և դրանք փոխանցում ԳԿՀ: Ընտրությունը կատարվում է ըստ տվյալների հաղորդման հապաղման ժամանակի, փաթեթների կորստի և այլ բնութագրերի: ԳԿՀ-ն ստանում է ՏՊԿ-ից եկած տվյալները և մշակում դրանք: Մշակման արդյունքում ձևավորում է առաջարկություններ և դրանք պատասխանի գեներատորի (ՊԳ) միջոցով ուղարկում օգտագործողին: Օգտագործողը, ստանալով այդ տեղեկությունները, որոշում է հետագա գործողությունները և ԳԿՀ-ին ուղարկում հաջորդ հրամանը: Եթե նման պարամետրերով սիմուլյացիայի արդյունքներ չեն գտնվել, կամ օգտագործողը չի ընդունել առաջարկված տարբերակները, ապա կատարվում է նոր սիմուլյացիա: Այս փուլում սիմուլյացիայի կառավարիչը (ՄԿ) ստանում է անհրաժեշտ տվյալները և դիմում է սիմուլյատորի ընտրման հանգույցին (ՍԸՀ): ՍԸՀ-ն, հաշվի առնելով ցանցով անցնող հնարավոր թրաֆիկը, ցանցի կառուցվածք, նրանում օգտագործված տեխնոլոգիաները, որոշում է, թե որ սիմուլյատորի միջոցով է նպատակահարմար իրականացնել սիմուլյացիան: Ընտրությունը կատարվում է բաց կոդով տարածվող և անվճար սիմուլյատորների միջև: Նման սիմուլյատորներից են OMNeT++-ը, ns2-ը, ns3-ը [6]: Սիմուլյացիայի արդյունքներն ուղարկվում են ԳԿՀ, որն այն մշակում է, ուղարկում ՏՊԿ՝ պահպանման համար և անհրաժեշտության դեպքում ՊԳ-ի միջոցով ուղարկում նաև օգտագործողին: Այս ընթացքում օգտագործողի կողմից կարող են գալ նաև այլ հրամաններ, օրինակ՝ սիմուլյացիայի դադարեցում կամ սիմուլյացիայի ընթացքի մասին տեղեկության տրամադրում: Այդ հրամանները նույնպես մշակում է ԳԿՀ-ն և համապատասխան հանգույցներին ուղարկվում դրանց կատարման հրամանները:

Գործիքային միջոցի վեբ մակարդակը մշակվել է ASP.NET MVC տեխնոլոգիայով, որը հասանելի է Windows օպերացիոն համակարգին, իսկ Mono նախագծի շնորհիվ՝ նաև Linux-ին: Ընտրվել է Amazon Elastic Compute Cloud (Amazon EC2) ամպային հարթակը, որն առաջարկում է լուծումներ և՛ Windows, և՛ Linux օպերացիոն համակարգերի համար:

Տարաբնույթ տրաֆիկի պայմաններում մասնագիտական քումփյութերային ցանցի կառուցվածքի նախագծման ավտոմատացված գործիքային միջոցի աշխատանքի բլոկ-սխեման բերված է նկ. 4-ում: Մուտքային հրամանների առկայության դեպքում սկսվում է դրանց մշակումը: Նախ՝ ստուգվում է, թե տվյալ օգտագործողի համար արդյոք արդեն սկսվել է սիմուլյացիայի գործընթացը: Եթե այո, ապա եկած հրամանն ուղարկվում է սիմուլյատորին: Հակառակ դեպքում՝ փորձ է արվում տվյալների պահոցում եղած տեղեկության հիման վրա առաջարկել նախագծվող ցանցի արդյունավետ կառուցվածք և տեխնոլոգիաների համախումբ: Քանի որ համակարգը երկխոսային է, այն պատրաստում է օգտագործողի համար նախատեսված պատասխան և ուղարկում:



Նկ. 4. Տարաբնույթ տրաֆիկի պայմաններում ցանցի կառուցվածքի նախագծման գործիքային միջոցի աշխատանքի բլոկ-սխեման

Մշակված ավտոմատացված համակարգի առանձնահատկություններից է ինքնուսուցման հնարավորությունը: Ինչպես արդեն նշվեց, այն հավաքագրում է բոլոր սիմուլյացիաների համար տրված մուտքային տվյալները և սիմուլյացիայի արդյունքները: Բնական է, որ որքան շատ սիմուլյացիա իրականացվի, այնքան համակարգն ավելի ճշգրիտ առաջարկություններ կանի:

Ժամանակակից ցանցային սիմուլյատորներով մասնագիտացված քոմպյուտերային ցանցի կառուցվածքի սիմուլյացիայի համար պահանջվող T ժամանակը կարելի է որոշել հետևյալ արտահայտությամբ.

$$T = T_u + T_w + T_l, \quad (2)$$

որտեղ T_u -ն սիմուլյացիայի իրականացման, T_w -ն ստացված արդյունքների վերլուծության, իսկ T_l -ն կառուցվածքի լավարկման համար անհրաժեշտ ժամանակն է: Քանի որ ոչ միշտ է հնարավոր առաջին փորձից ստանալ մասնագիտացված ցանցի արդյունավետ կառուցվածք, ապա T_u ժամանակը ներկայացնում է n քանակով փորձարկումների վրա ծախսված ժամանակի գումարը.

$$T_u = \sum_{i=1}^n T_{ui}: \quad (3)$$

Նույն պատճառով T_w և T_l ժամանակները կորոշվեն համապատասխանաբար արտահայտություն (4)-ով և (5)-ով.

$$T_w = \sum_{i=1}^n T_{wi}, \quad (4)$$

$$T_l = \sum_{i=1}^n T_{li} : \quad (5)$$

Քանի որ մշակված մասնագիտացված քոմփյուտերային ցանցերի կառուցվածքի նախագծման ավտոմատացված գործիքային միջոցն ունի արդեն իսկ տեղի ունեցած սիմուլյացիաների արդյունքները, և կառուցվածքի լավարկան փուլում նոր սիմուլյացիայի իրականացման փոխարեն կարող է առաջարկել կառուցվածքի արդյունավետ տարբերակ՝ հիմնվելով այդ տվյալների վրա, ապա այս գործիքային միջոցով նույն կառուցվածքով մասնագիտացված քոմփյուտերային ցանցի նախագծման համար անհրաժեշտ T_b ժամանակը շատ դեպքերում ավելի քիչ է, քան T_q գույություն ունեցող այլ սիմուլյատորներինը.

$$T_b \leq T_q : \quad (6)$$

Մասնագիտացված քոմփյուտերային ցանցերի կառուցվածքի նախագծման ավտոմատացված գործիքային միջոցի կիրառումը: Մշակված ավտոմատացված գործիքային միջոցը փորձարկվել է Հայաստանի առողջապահության ազգային ինստիտուտի հեռաբժշկության քոմփյուտերային ցանցի կառուցվածքի առաջարկը մշակելիս: Ցանցը նախագծելիս հաշվի է առնվել նաև այն համագամանքը, որ վիդեոկոնֆերանսներ կարող են կազմակերպվել Հայաստանի մարզերում գտնվող բժշկական հաստատությունների հետ, որտեղ չկան կապի ժամանակակից սարքավորումներ: Այդ իսկ պատճառով նախագծվող հեռաբժշկության քոմփյուտերային ցանցի համար առաջարկվել է ընտրել այն արտադրողների սարքավորումները, որոնք վիդեոկոնֆերանս կազմակերպելիս թույլ են տալիս օգտվել համացանցում կիրառվող ստանդարտներից: Մասնավորապես, հեռաբժշկական կոնսուլտացիաների բաժնի համար նախատեսված ենթացանցում հիմնականում առաջարկվել են վիդեոկոնֆերանսի D-Link ընկերության սարքավորումները:

Հեռաբժշկական քոմփյուտերային ցանցի կառուցման նախագծման համար դիտարկվել է WiFi տեխնոլոգիայի միջոցով անլար ցանցի տարբերակը նույնպես: Դա թույլ կտա հեշտությամբ փոխել վիդեոկոնֆերանսի սարքավորումների դիրքը WiFi ծածկույթ ապահովող տարածքում: Սիմուլյացիայի ընթացքում ավտոմատացված գործիքային միջոցն առաջարկել է կիրառել Ethernet տեխնոլոգիան, քանի որ WiFi-ի կիրառման դեպքում հնարավոր է ձայնի և վիդեո պատկերի որակի նկատելի անկում: Նման առաջարկ մշակված ավտոմատացված համակարգը կայացրել է՝ հաշվի առնելով նախորդ սիմուլյացիաների արդյունքները [7]: Առավել մատչելի գնի շնորհիվ՝ հիմնականում առաջարկվել են D-Link ընկերության սարքավորումները:

Հաշվի առնելով սիմուլյացիայի արդյունքները և Հայաստանի առողջապահության ազգային ինստիտուտի հեռաբժշկության ցանցի բաղադրիչ մասերը (վիդեոն-ֆերանսի սարքավորումներ, աշխատակիցների քոմփյութերներ) և դրանց դասավորությունն աշխատասենյակներում, ցանցի կառուցման համար առաջարկվել է կիրառել D-Link DES-1024A մոդելի 24 - պորտանոց կամ D-Link DES-3200-28P մոդելի 28 - պորտանոց սվիչ և D-Link DIR-620 D-Link DIR-100 մոդելի երթուղավորիչ:

Եզրակացություն: Մշակվել է մասնագիտացված քոմփյութերային ցանցերի ավտոմատացված գործիքային միջոց, որը վեբ ստանդարտների կիրառման շնորհիվ թույլ է տալիս շարժական սարքավորումներից օգտվել քոմփյութերների համար նախատեսված սիմուլյատորներից:

Աշխատանքում նկարագրվել է նման համակարգի ճարտարապետությունը, հիմնավորվել է մշակված գործիքային միջոցի արդյունավետությունը:

Ներկայացված ավտոմատացված համակարգի առավելություններից են.

- մի քանի օգտագործողների միաժամանակյա սպասարկման հնարավորություն,
- տարբեր սարքավորումներից միևնույն սիմուլյացիայի հսկման և կառավարման հնարավորություն,
- ամպային տեխնոլոգիաներին ինտեգրվելու հնարավորություն,
- տարաբնույթ թրաֆիկի գեներացման հնարավորություն,
- ավարտված սիմուլյացիաների արդյունքների հիման վրա սիմուլացվող քոմփյութերային ցանցի արդյունավետ կառուցվածք առաջարկելու հնարավորություն:

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. <http://www.developereconomics.com/reports/q3-2013/>
2. <http://www.stevesouders.com/blog/2013/05/09/how-fast-are-we-going-now/>
3. **Buyya R., Broberg J., Goscinski A.** Cloud Computing: Principles and Paradigms.- Wiley, 2011. – 664 p.
4. **Nowak M., Novak S.** Parallel simulations with modified INET simulation package // Theoretical and Applied Informatics.- Warsaw, 2007. - Vol. 19, N 2.- P. 147-156.
5. **Krishnan S.S., Sitaraman R.K.** Video Stream Quality Impacts Viewer Behavior: Inferring Causality Using Quasi-Experimental Designs // Networking, IEEE/ACM Transactions.-2013. - Vol. 21.- P. 2001-2014.
6. **Միքայելյան Ս.Ա., Կիրակոսյան Ռ.Գ.** Քոմփյութերային ցանցերի նախագծման ժամանակակից սիմուլյատորների հետազոտումը, համեմատական գնահատումը և կիրառումը // ՀՀ ԳԱԱ և ՀՊՃՀ տեղեկագիր.Տեխնիկական գիտությունների սերիա. - 2013. - Հատոր LXVI, N 3. - էջ 215-221:
7. **Siradeghyan S.A., Kirakossian R.G.** Performance Evaluation of VoIP Traffic on Wired and Wireless Networks // Proceedings of the 9th international conference "Computer Science and Information Technologies." - Yerevan, 2013. - P. 376-378.

ՀՊՃՀ (ՊՈԼԻՏԵԽՆԻԿ): Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 11.03.2014:

С.А. СИРАДЕГЯН, Р.Г. КИРАКОСЯН

**РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО
СРЕДСТВА ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ
СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ КОМПЬЮТЕРНЫХ СЕТЕЙ**

Разработано автоматизированное инструментальное средство для проектирования структуры специализированных компьютерных сетей, которое было испытано во время разработки предлагаемой структуры сети телемедицины Национального института здравоохранения Армении. Проектированное инструментальное средство позволяет сэкономить время, нужное для различных сценариев, и на основании результатов предыдущих опытов получить эффективную структуру сети.

Ключевые слова: веб-приложения, специализированные сети, симулятор, проектирование сети, мобильное программирование, телемедицина.

S.A. SIRADEGHYAN, R.G. KIRAKOSSIAN

**DEVELOPING AUTOMATED TOOLS FOR DESIGNING A STRUCTURE FOR
SPECIALIZED COMPUTER NETWORKS**

An automated tool for designing a structure for specialized computer networks is developed which has been tested at developing the proposed structure of a telemedicine network of the National Institute of Health of Armenia. The designed tool allows to save time required for different scenarios, and is based on the results of the previous experiments, to obtain an effective network structure.

Keywords: web-development, specialized networks, simulator, network design, mobile programming, telemedicine.

V.SH. MELIKYAN, H.H. DINGCHYAN, A.S. SAHAKYAN,
A.G. HAYRAPETYAN, V.S. BABAYAN, A.S. MARTIROSYAN

A LOW VOLTAGE CURRENT MIRROR WITH A HIGH OUTPUT VOLTAGE SWING

A circuit of the current mirror is proposed providing 85% precise current copying even in the linear region of the transistor operation. It can copy currents in power supply low voltage cases when transistors enter the triode region due to less overdrive voltages. Compared with the classic current mirror, the proposed structure provides about 0.94 V (normalized to power supply value) voltage range operation without degrading process variations related mismatches of currents. These are possible to be used in low voltage and low power analog and mixed-signal designs where they can provide a higher accuracy than the conventional current mirror.

Keywords: low voltage, current mirror, CMOS.

Introduction. The current mirror is fundamental building block in analog and mixed signal IC design which is used for biasing to provide active loads in differential amplifiers and for current-mode signal processing. In many circuits, the performance of the elementary current mirror is sometimes improper, because of a systematic gain error and comparably low output resistance [1]. In low voltage corners, these types of issues appear when devices operate out of the saturation region and the solution of these problems require structural changes. For example, in biasing and some other structure current mirrors used in the big part of a design, when the transistor is going out of the saturation region, the current variation depending on voltage becomes bigger causing a big error during current mirroring [2].

To achieve low power consumption and a high speed performance in modern analog and mixed-signal integrated circuits, devices are supplied by low voltages so as to provide low transition time and low current consumption. As CMOS technology is scaling power supply voltage scales down as well, but the threshold of transistors are not scaled by the same scaling factor as the power supply does [3]. But this scaling gives rise to some limitations and problems which require structural solutions. One of the main problems is that analog structures have exact operation voltage ranges in which transistors operate in the saturation region and when the supply voltage is going down, this region is becoming smaller and keeping these structures in a good operation mode is becoming more difficult [4].

Current mirrors which are mostly used in analog and mixed-signal designs as a building block, operate in some limited voltage range, because when transistors are going out of the saturation region, the accuracy of current copying is becoming smaller.

The idea of the proposed technique is to keep the current copying accuracy as much as possible not only in the transistor's saturation region, but also in linear region by giving some structural solutions in active current mirror structures.

The general approach is to embed in conventional architecture of current mirrors, negative feedback which can keep the current copying in the operation region 30% more when compared with the standard mirror transistors switching from saturation to triode region due to low supply voltages.

General parameters of linear region operated active current mirror architecture. In [5] reference parameters definitions are introduced for the passive and active current mirrors. These parameters completely describe the mirror behavioral small signal parameters. In this section, analytical expressions will be solved out for the proposed solution.

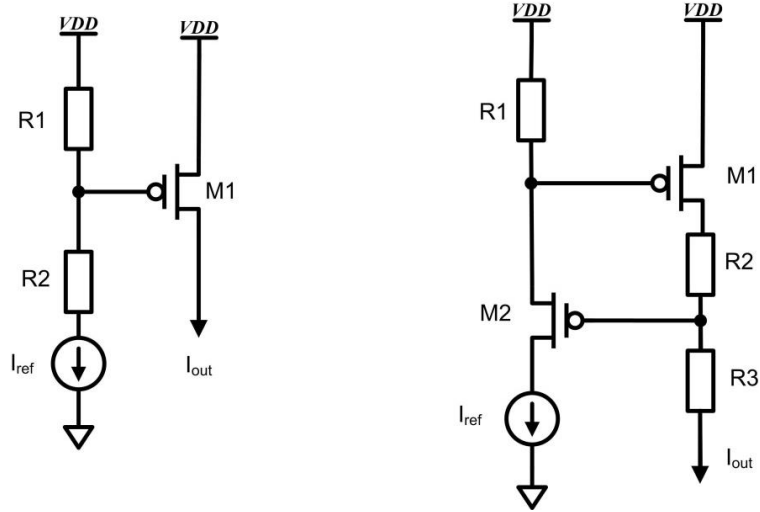


Fig. 1. Conventional and proposed current mirrors

The first parameter which is introduced is the output current for both conventional (1) and proposed (2) current mirrors (Fig. 1). The output current defines the amount of the current which is a result of copying from the reference one. The equation of the output current can be written as

$$I_{out} \approx \frac{1}{2} \mu_p C_{ox} \frac{W}{L} \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{DD} - V_{THp} \right)^2 \approx I_{ref} , \quad (1)$$

$$I_{out} \approx \frac{1}{2} \mu_p C_{ox} \frac{W_1}{L_1} \left(\frac{1/g_{m2}}{R_1 + 1/g_{m2}} V_{DD} - V_{THp} \right)^2 \approx I_{ref} , \quad (2)$$

where I_{out} is the mirror output currents, μ_p is the hole's mobility of the PMOS transistor, C_{ox} is the unit capacity of the MOS transistor under-gate isolator and g_{m2} is the M2 transistor conductivity.

The expression for the output current will be calculated based on equations (1) and (2). Fig. 1 presents the proposed current mirror which consists of the additional M_2 transistor biasing by R_2 and R_3 resistive divider. This structure takes the role of negative feedback which can keep the current copying accuracy even when M_1 -the main mirror transistor is out of the saturation region and can change its drain-source resistance linearly depending on the branch current.

The main mechanism providing the linear region operation. The idea of that mechanism is to add a negative feedback sensitive circuit to the mirror architecture. That mechanism can keep the whole mirroring system in the operational region dynamically in case of different overdrive voltages for the mirror device.

Starting from the one of low overdrive voltage the mirror can go out of the well-operating condition. The proposed method can sense that and keep a good performance which in case of mirrors means current high accuracy copying. The block diagram on Fig. 2 is proposed to copy the reference current and have a high accuracy of current duplication in case of low supply voltage and hence overdrive voltages. In this structure, to avoid unequal distribution, the system which is in the negative feedback condition is used.

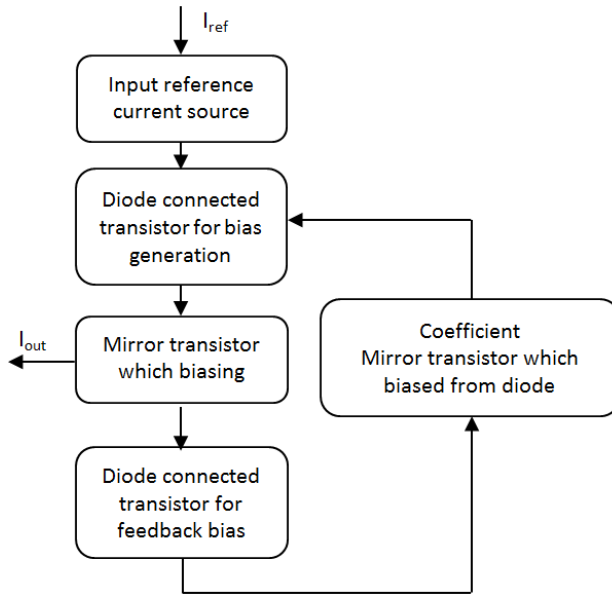


Fig. 2. A block diagram of the proposed linear region operation method

The reference current of the circuit followed through the diode-connected transistor generates bias voltage for the M1 transistor the operation condition of which depends on its drain-source voltage. Due to this dependence, different operations can be obtained hence different current copying accuracy. For this reason, it is necessary to create some negative feedback to dynamically stabilize the overdrive voltage on the M1 device. In the proposed circuit (Fig. 3), the negative feedback is composed by the M2 and M4 transistors creating vice dependency between the two branches of this architecture. The coefficient of the negative feedback depends on the proportionality of the M2 and M4 transistor W/L ratios which can be manipulated to match the currents in the two branches.

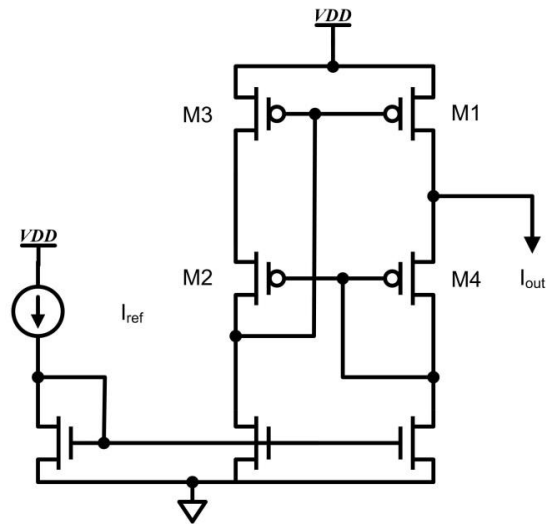


Fig. 3. The proposed current mirror

The simulation results. The conventional and proposed current mirror architecture has been designed with “SAED32nm” library and studied with HSPICE simulator. The simulation results show (Fig. 4) that in the proposed current mirror, the voltage swing on the output increases by about 0.2 V versus conventional. When the drain-source voltage of the M1 transistor is close to 1.6 ... 1.8 V, it enters into the linear region of operation causing the output current to drop drastically, but in the proposed current mirror, it is seen that the current remains constant even in the linear region.

Also, the conventional and proposed current mirrors have been simulated with MONTE CARLO analysis (the number of samples is 100, e.g. the accuracy is about 98%) to check the process variability. As seen from Fig. 5, the standard deviation of the current is similar for both architectures and equal to 1.12 μA and 1.4 μA for the conventional and proposed current mirrors respectively.

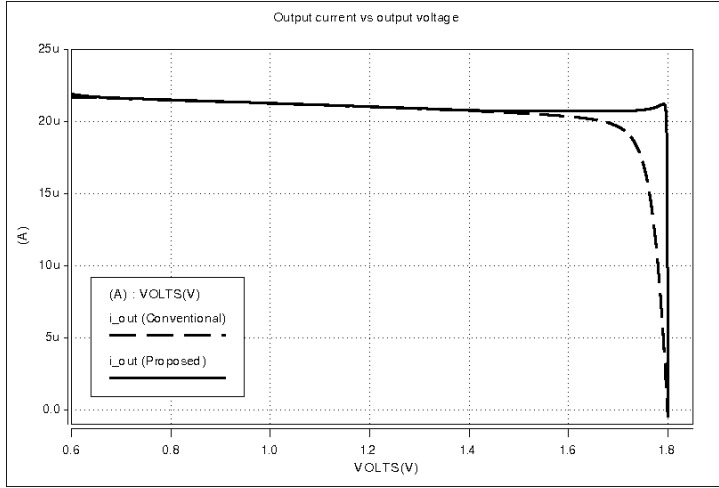


Fig. 4. The current vs output voltage for both conventional and proposed current mirrors

This means that introducing additional transistors in feedback does not cause more variation over the process mismatches.

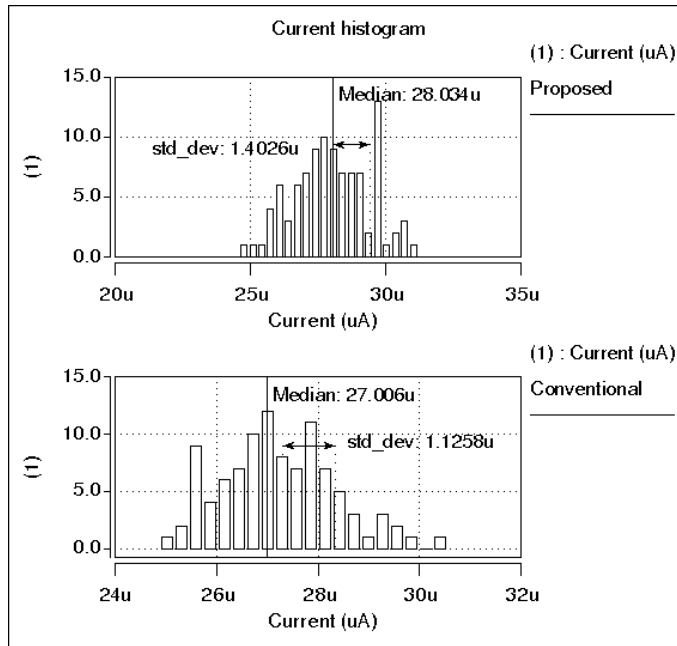


Fig. 5. The current histogram for both conventional and proposed current mirrors

The most important parameter for current mirrors is the “mirroring accuracy” from the reference current and the output current. So the summarized table with an accuracy relative to the drain-source voltage of M1 is presented in Table 1.

Table 1

Mirroring accuracy dependency on M1 overdrive voltage

M1 overdrive voltage, mV	Conventional current mirror		Proposed current mirror	
	Mirroring accuracy, %	M1 operating region	Mirroring accuracy, %	M1 operating region
400	98	Saturation	99	Saturation
200	87	Saturation	97	Saturation
100	80	Saturation	91	Saturation
50	20	Triode	89	Triode
25	5	Triode	85	Triode

Also, the comparative analysis has been carried out on the leakage current consumption which is presented in Table 2. It is seen that the leakage current decreases by about twice.

Table 2

Leakage current consumption comparison

Bounds Corner	Conventional current mirror		Proposed current mirror	
	Leakage current, nA	Leakage Power, nW	Leakage current, nA	Leakage Power, nW
TT/25	21	37.8	8	14.4
FF/-40	29	52.2	11	19.8
SS/125	14	52.2	6	10.8

The output resistance has also been measured versus voltage overdrive on the M1 transistor to show the improved region where the resistance is still linearly proportional to the drain source voltage of the M1 transistor (Fig. 6).

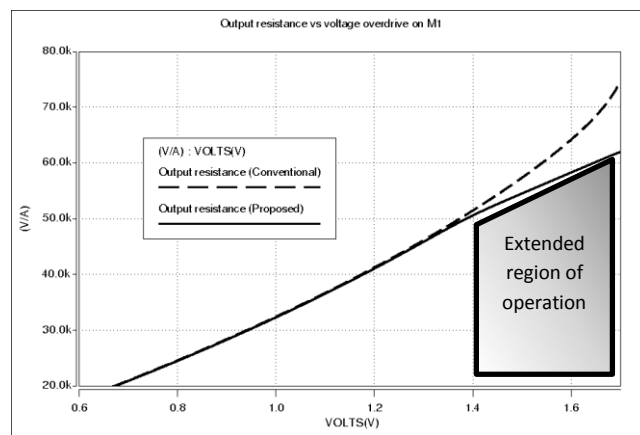


Fig. 6. The output resistance for both conventional and proposed current mirrors

Conclusion. This paper proposes a current mirror which can operate in the linear region of operation simultaneously providing a precise current copying. Negative feedback is embedded in the proposed current mirror which helps to have current mirroring even when the transistors enter the undesired region of operations (e.g. triode region). With this negative feedback, the output voltage swing increases by about 0.2 V relative to the conventional current mirror which is beneficial when analog and mixed signal circuits need to work properly in low voltage conditions. MONTE CARLO simulations also show that the variation is not degraded due to additional transistors used in the feedback path. The standard deviation of the current increases by 25% in the proposed current mirror.

REFERENCES

1. **Minch, B.A.** A low-voltage MOS cascode current mirror for all current levels // Circuits and System.- 2002.- Vol.2 .- P. 53-64.
2. **Aggarwal, B., Gupta, M., Gupta, A.K.** A low voltage wide swing level shifted FVF based current mirror // Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI) International Conference.- 2013.- P. 880 – 885.
3. **Vajpayee, P., Srivastava, A., Rajput, S.S., Sharma, G.K.** Low voltage regulated cascode current mirrors suitable for sub-1V operation // Circuits and Systems (APCCAS) IEEE Asia Pacific Conference.- 2010.- P. 584 – 587.
4. **Laoudias, C., Psychalinos, C.** Low-voltage CMOS adjustable current mirror // Electronics Letters.- 2010.- P. 124 – 126.
5. **Sendi, M.S.E., Toosi K.N., Gatabi, I.R.** Improved low voltage all cascode mirror current source using the DC level shifter // Circuits and Systems.- 2007.- P. 171-172.

Synopsys Armenia CJSC; State Engineering University of Armenia (Polytechnic);
Russian-Armenian (Slavonic) University. The material is received 10.03.2014.

**Վ.Շ. ՄԵԼԻՔՅԱՆ, Հ.Հ. ԴԻՆԳՅԱՆ, Ա.Ս. ՄԱՀԱԿՅԱՆ,
Ա.Հ. ՀԱՅՐԱՊԵՏՅԱՆ, Վ.Ս. ԲԱԲԱՅԱՆ, Ա.Ս. ՄԱՐՏԻՐՈՍՅԱՆ**

**ՑԱՐԴԱՎՈՐՆԵՎ ԵՎ ԵԼՔԱՑԻՆ ԼԱՐՄԱՆ ՄԵԾ ԱՇԽԱՏԱՆՔԱՑԻՆ ՏԻՐՈՒՑԹՈՎ ՀՈՍԱՆՔԻ
ՀԱՅԵԼԻ**

Առաջարկվել է տրանզիստորների՝ նույնիսկ գծային աշխատանքային տիրույթներում կրկնօրինակման մոտ 85% ճշտություն ապահովող հոսանքի հայելու սխեմա: Մնման լարման փոքր արժեքների դեպքում՝ այսինքն ակունք-արտաբեր լարման փոքր արժեքների պատճառով տրանզիստորների գծային աշխատանքային ռեժիմ անցնելու պարագայում, հայելին ունակ է կրկնօրինակելու հոսանքները: Չվատթարացնելով հոսանքների տեխնոլոգիական շեղումներով պայմանավորված անճշտությունները՝ առաջարկված տարբերակը ավանդական հոսանքի հայելու սխեմային գերազանցում է ելքային լարման աշխատանքային տիրույթով՝ հասցնելով այն ընդհուպ մինչև 0,94 Վ (նորմավորված սնման լարման արժեքին): Հոսանքի հայելու ավանդական սխեմայի համեմատ զգալիորեն ավելի մեծ ճշտություն ապահովելու շնորհիվ՝ մշակված սխեման կարող է լայնորեն կիրառվել ցածրավոլտ և փոքր էներգասպառմամբ անալոգային և խառը ազդանշանային համակարգերում:

Առանցքային բառեր. ցածր լարում, հոսանքի հայելի, ԿՄՕԿ:

**В.Ш. МЕЛИКЯН, А.Г. ДИНГЧЯН, А.С. СААКЯН,
А.Г. АЙРАПЕТЯН, В.С. БАБАЯН, А.С. МАРТИРОСЯН**

**НИЗКОВОЛЬТНОЕ ТОКОВОЕ ЗЕРКАЛО С БОЛЬШИМ ВЫХОДНЫМ
ДИАПАЗОНОМ НАПРЯЖЕНИЯ**

Предложена схема токового зеркала, обеспечивающая даже в линейных рабочих областях транзисторов точность копирования $\sim 85\%$. Схема способна копировать токи при небольших значениях напряжения питания, т.е. в случае перехода транзисторов в линейный рабочий режим из-за маленьких значений напряжения исток-сток. Предложенная схема превосходит традиционную схему с диапазоном выходного рабочего напряжения вплоть до $0,94 V$ (нормированное значение напряжения питания), не ухудшая при этом обусловленные технологическими разбросами точности токов. За счет обеспечения существенно высокой точности по сравнению с традиционными схемами предложенное решение может широко применяться в аналоговых и аналого-цифровых схемах с низким энергопотреблением.

Ключевые слова: низкое напряжение, токовое зеркало, КМОП.

М.В. МАРКОСЯН, В.Г. АВETИСЯН, А.А. ОГАНЕСЯН,
А.К. АГАРОНЯН, А.И. ПЕТРОСЯН, Г.З. СУГЯН

МОДЕРНИЗАЦИЯ АНТЕННОЙ СИСТЕМЫ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СТАНЦИИ ДИАПАЗОНА МЕТРОВЫХ ВОЛН

Приводятся результаты исследований и технические решения при модернизации антенной системы радиолокационной станции диапазона метровых волн, направленных на повышение ее радиотехнических параметров и мобильности. Исследуются вопросы модернизации в радиотехническом направлении.

Ключевые слова: антенная система, модернизация, радиолокационная станция, диапазон метровых волн.

Введение. Современные комплексы радиолокационного обнаружения воздушных объектов (ВО) охватывают радиолокационные станции (РЛС) различных диапазонов, начиная с метровых волн и включая сверхвысокочастотный (СВЧ) диапазон. Такой широкий охват частотных диапазонов обусловлен стремительными темпами конструктивных и технологических разработок для ВО, направленных на минимизацию отражений от них. С этой точки зрения РЛС диапазона ультракоротких волн (УКВ) успешно конкурируют с РЛС диапазона СВЧ. Одновременно они дополняют друг друга и повышают возможность надежного обнаружения ВО. Эксплуатация РЛС в современных условиях требует повышения их тактико-технических характеристик, в частности, по дальности обнаружения ВО, по точности определения их координат. С другой стороны, современные возможности средств обнаружения самой РЛС и ее уничтожения настоятельно требуют повышения ее мобильности [1], которая во многом определяется временем сворачивания РЛС из рабочего положения в транспортное и наоборот.

Для РЛС диапазона УКВ, являющихся объектами с громоздкой антенной системой, в первую очередь возникает необходимость модернизации антенной системы, конструкцией которой в основном определяются вышеупомянутые характеристики. Задача модернизации антенной системы подразделяется на два направления: первое – модернизация антенной системы в радиотехническом плане; второе – модернизация антенной системы в конструкторско-технологическом плане. Эти два направления тесно увязаны друг с другом, поскольку выбор излучателей антенной решетки и системы их возбуждения (с точки зрения их формы и габаритных размеров) во многом определяет выбор конструктивных и технологических решений для оптимальной компоновки всей антенной системы в транспортное состояние. При этом антенная система должна удовлетворять

дополнительным требованиям на влажность и температуру, на работоспособность в зависимости от вида атмосферных гидрометеоров и их состава, на работоспособность в условиях ветровых нагрузок.

Цель работы – в сжатой форме представить исследования и решения, направленные на повышение радиотехнических параметров антенной системы РЛС диапазона УКВ и увеличение мобильности РЛС за счет сокращения времени перевода РЛС из транспортного положения в боевую готовность и обратно.

Излучатели антенной решетки. Во избежание существенного увеличения громоздкости антенной системы РЛС диапазона УКВ в модернизированном варианте предусматривалась антенная решетка, состоящая из двух этажей с линейными рядами излучателей. Как отмечалось выше, решение задачи повышения мобильности РЛС изначально связано с выбором антенн-излучателей решетки. Однако их выбором определяются также направленные свойства антенной решетки – ее диаграмма направленности (ДН), коэффициент усиления (КУ), уровни боковых лепестков (УБЛ) и т.д.

С этой целью был проведен сравнительный анализ различных антенн в качестве возможных излучателей антенных решеток УКВ диапазона [2 – 4]. Это логопериодическая антенна, ромбовидная антенна Харченко, антенны типа “волновой канал” и кольцевая антенна [5], разработанная и спроектированная по подобию микрополосковой антенны, предложенной в [6]. Анализ сравнения проводился по следующим электрическим параметрам – полоса рабочих частот, коэффициент стоячей волны по напряжению (КСВН) и КУ. При этом особое внимание обращалось на приемлемость их весогабаритных параметров и, особенно, продольных размеров вдоль их оси излучения. Критерии выбора по первым трем электрическим параметрам определяют радиотехнические параметры антенной решетки в целом – ее широкополосность, ДН, КУ, УБЛ и КСВН. Критерий выбора по габаритным размерам определяет компоновку свертывания антенной решетки в транспортное положение и возможность горизонтирования излучателей антенной решетки. Последнее ощутимо отражается на формировании необходимой ДН решетки в вертикальной плоскости.

По результатам расчетов и моделирования было выявлено, что наиболее приемлемыми величинами по параметрам сравнительного анализа обладает кольцевая антенна. Параметры оказались следующими: относительная ширина полосы рабочих частот – около 20...25%, $КСВН \leq 1,6$, $КУ \approx 8,5...9$ дБ при размере рефлектора $1,2 \times 1,2$ м и продольном размере вдоль оси излучения 0,2 м.

Результаты моделирования кольцевой антенны с использованием пакета программ FEKO 5.5 приведены на рис. 1 и 2.

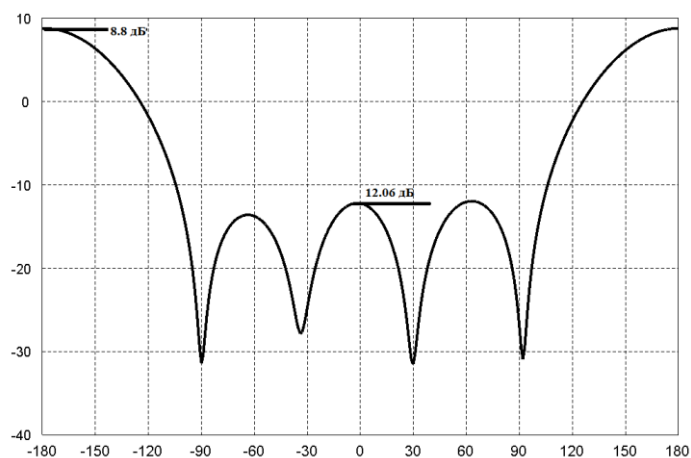


Рис. 1. ДН кольцевой антенны в E-плоскости

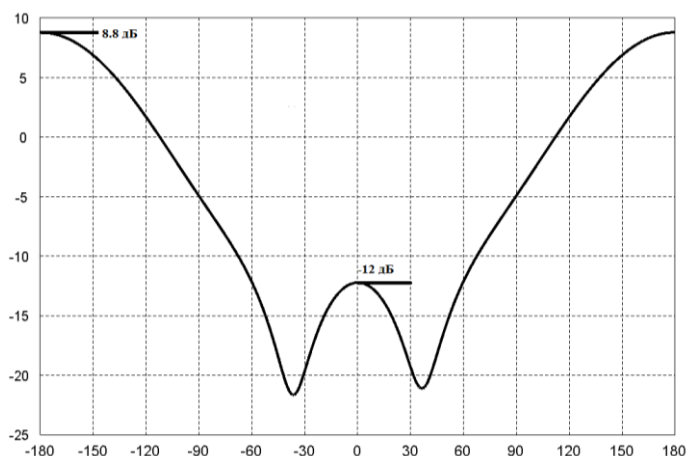


Рис. 2. ДН кольцевой антенны в H-плоскости

На рис. 3 изображены рабочая конструкция кольцевой антенны линейной горизонтальной поляризации и ее общий вид. Для уменьшения веса и парусности антенны ее рефлектор и металлический диск выполнены в виде металлической сетки, а кольцевой излучатель перфорирован. Излучатель и металлический диск крепятся друг к другу с помощью диэлектрических капролоновых вставок. Подвод питания антенны осуществляется коаксиальным кабелем с волновым сопротивлением 50 Ом , который проходит через отрезок трубки, соединяющей металлический диск и рефлектор. Центральная жила кабеля соединена с внутренним краем кольцевого излучателя, а экран кабеля соединен с металлическим диском. Масса антенны - около $6,5 \text{ кг}$.

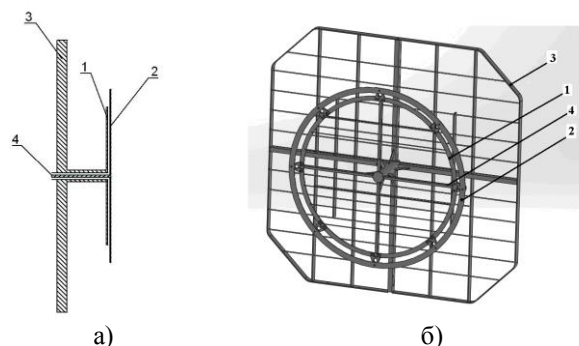


Рис.3. Кольцевая антенна (а) и ее общий вид (б): 1 - металлический диск, 2 - кольцевой излучатель, 3 - рефлектор, 4 - питающий коаксиальный кабель

Для усовершенствования выполнения наземных измерений антенны и минимизации погрешностей определения ее ДН и КУ (соответствующих условиям свободного пространства) из наземных измерений при наличии зеркального отражения от Земли была теоретически исследована задача приема [7]. В результате была предложена эквивалентная модель двухлучевого приема с приемными виртуальными антеннами, на основе которой была разработана методика определения искомых параметров из измерений по методу двух идентичных антенн [8]. Исходя из этой модели приема, была выбрана оптимальная конфигурация расположения двух идентичных кольцевых антенн и проведены измерения по определению искомых ДН и КУ [5].

В конфигурации расстояние между идентичными кольцевыми антеннами превышало минимальное расстояние их дальней зоны в 2,5 раза. Отношение путей прямой и отраженной волн в выбранной конфигурации (см. рис. 4) составляет $r_0 / r \approx 0,35$, угол $\varphi_0 = 70^\circ$, а отношение коэффициентов усиления $KУ(70^\circ) / KУ(0^\circ) = -9 \text{ дБ}$ (0,126) согласно результатам их моделирования и предварительных оценочных измерений диаграмм направленности. Согласно теоретической оценке, погрешность в определении КУ, обусловленная отраженным лучом, составляла около 0,2 дБ, что меньше погрешности, обусловленной погрешностью Δr_0 установки расстояния между антеннами, которая при $\Delta r_0 = 0,15 \text{ м}$ равна 0,22 дБ. Отсчет измерений задавался n-кодером через шаг в $0,5^\circ$ при вращении антенны. Ширина ДН на уровне -3 дБ составляла 62° , уровень заднего лепестка -20 дБ, уровень кросс-поляризации -20 дБ. Расхождение результатов измерения и моделирования КУ оказалось не более 0,3 дБ.

Выбранная конфигурация расположения кольцевых антенн при измерениях методом двух идентичных антенн изображена на рис. 4. Фото их расположения представлено на рис. 5. Измеренная ДН антенны приведена на рис. 6.

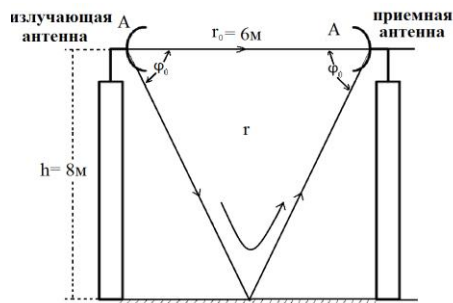


Рис. 4. Расположение антенн относительно друг друга и Земли



Рис. 5. Расположение антенн на вышках при измерении

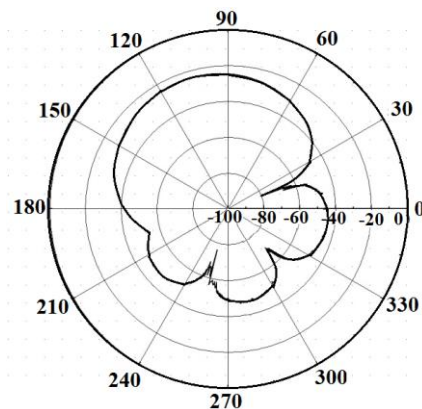


Рис. 6. Измеренная ДН антенны

Антенная решетка. Изготовленный макет решетки содержал два этажа излучателей из 24 кольцевых антенн: по 12 штук в каждом линейном ряду. Размеры макета составляли: по горизонтали – 17,7 м, по вертикали – 3,6 м. Возбуждение антенн в каждом этаже синфазное. Относительная малость продольного размера (0,2 м) антенн вдоль оси излучения использована для их сворачивания в горизонтальное положение при переводе антенной решетки в транспортное состояние. Для этого антенны нижнего этажа относительно антенн верхнего этажа смещены в вертикальной плоскости на расстояние 0,08 м. Фаза возбуждения антенн верхнего этажа такова, что с учетом этого смещения этажей она отстает на 90° от фазы возбуждения нижнего этажа. Амплитуды возбуждения обоих этажей одинаковы, однако в каждом этаже амплитудное распределение изменяется от центральных антенн к краевым согласно закону Дольфа-Чебышева для обеспечения низких УБЛ антенной решетки. Для осуществления расчетного амплитудного распределения были разработаны соответствующие делители мощности низкого уровня в полосковом исполнении (делители Вилкинсона) и делители мощности высокого уровня на коаксиальных кольцевых мостах.

Предварительные измерения ДН и КУ макета антенной решетки в режиме ее приема были выполнены облетным методом на территории летного поля. В качестве летательного аппарата использовали вертолет МИ8-МТВ. Для снижения погрешностей измерений, обусловленных влиянием корпуса и винта вертолета на ДН измерительного излучающего полуволнового вибратора, в [9] было предложено специальное устройство, размещаемое под днищем вертолета. Реализованное устройство представляет собой новую излучающую систему “вибратор-короб”. Короб имеет особую конструкцию и содержит поглотители электромагнитной энергии. Длина короба - около 2λ , ширина - около $1,5\lambda$, высота - $0,5\lambda$. Масса короба - менее 100 кг. Такой вес и заостренная с концов форма короба практически не влияют на аэродинамические характеристики вертолета. До измерения параметров антенной решетки было проведено измерение ДН и КУ излучающей системы “вибратор-короб” с использованием измеренной кольцевой антенны в качестве образцовой.

На рис. 7 изображено расположение короба вместе с вибратором относительно вертолета. На рис. 8 представлено фото вертолета с закрепленным под его днищем коробом. На рис. 9 приведено фото короба с вибратором при монтаже на вышку стенда, изображенного на рис. 5.



Рис. 7. Конфигурация системы “вертолет–короб–вибратор”



Рис. 8. Закрепленный под днищем вертолета короб



Рис. 9. Короб с полуволновым вибратором

На рис. 10 а, б приведены измеренные ДН системы “короб–вибратор”.

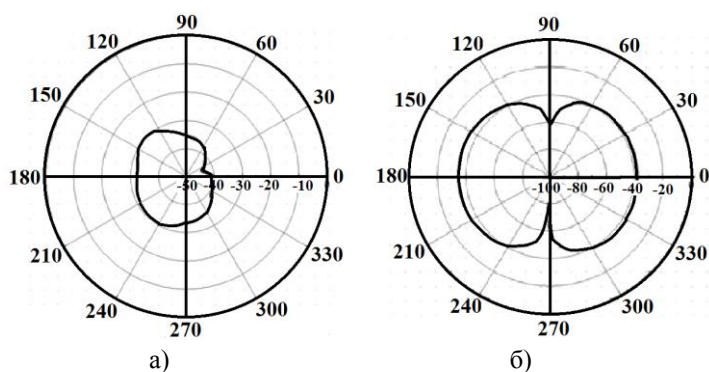


Рис. 10. Измеренные ДН полуволнового вибратора в сборе с коробом:
а - ориентация короба – вертикальная; низ короба – одно из его длинных ребер;
б - ориентация короба – горизонтальная, полуволновой вибратор сверху короба

На рис. 11 приведено фото изготовленного макета антенной решетки, смонтированного на летном поле для измерений.



Рис. 11. Макет антенной решетки на летном поле

Для определения параметров антенной решетки был разработан и использован способ измерений, выгодно отличающийся по стоимости затрат на их выполнение [10]. Способ основан на специальной программе вертикальных и горизонтальных полетов вертолета. При медленных вертикальном подъеме и спуске вертолета в дальней зоне антенной решетки измерялась угломестная (вертикальная) ДН в пределах углов $180...160^{\circ}$ и $0...20^{\circ}$ в верхней вертикальной плоскости, т.е. по заднему лепестку и в его окрестности, а также в наиважнейшем секторе углов

($0...20^\circ$) с точки зрения обнаружения ВО. Затем с помощью горизонтальных полетов вертолета в плоскости главного сечения вертикальной ДН на 6 высотных этажах (высота первого этажа полета – 20 м, а последнего 6-го этажа – 500 м) измерялась угломестная ДН в интервале углов $1...179^\circ$. По сути дела, это измерение, дублируя измерения ДН в наиважнейшем секторе углов ($0...20^\circ$), также дает информацию о “воронке” в области зенита, что тоже существенно для работы РЛС.

При измерениях угломестной ДН привязка координат (высота над Землей и горизонтальное удаление от антенной решетки) вертолета в полете с отсчетами соответствующих регистраций сигнала измерительным наземным комплексом осуществлялась синхронизацией работы GPS навигаторов, находящихся у оператора измерительного наземного комплекса и штурмана вертолета.

Азимутальная (горизонтальная) ДН в направлениях максимумов лепестков угломестной ДН измерялась при зависшем положении вертолета и вращении антенной решетки на 360° вокруг ее вертикальной оси. Отсчеты снимались через дискрет в $0,5^\circ$, задаваемый п-кодером привода вращения.

Предварительные результаты измерений макета модернизированной антенной решетки показали удовлетворительное совпадение с результатами ее моделирования (выполненного с использованием пакета программ ФЕКО 5.5) как по ширине главного лепестка ДН в азимутальной плоскости, так и по КУ, УБЛ и направлениям максимумов и минимумов лепестков угломестной ДН. На рис. 12 и 13 представлены результаты измерений ДН в угломестной и азимутальной плоскостях.

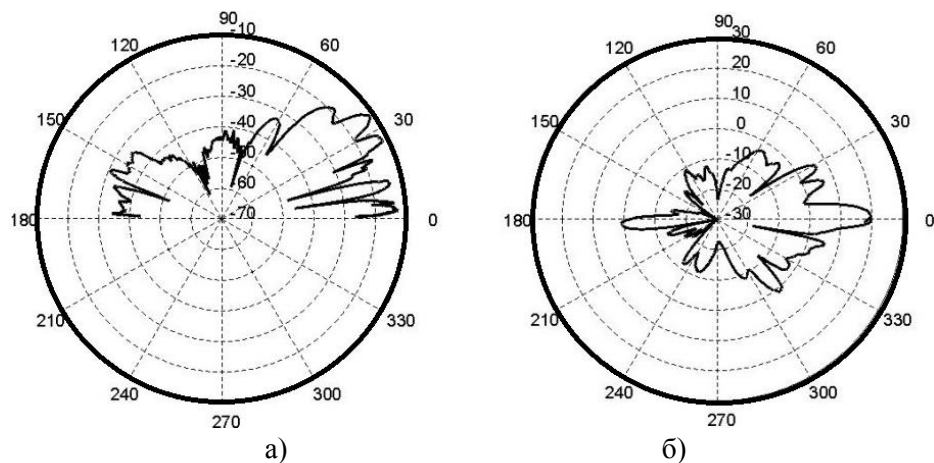


Рис. 12. ДН в угломестной плоскости (а), измеренная при горизонтальных полетах (сектор углов $1...179^\circ$); ДН в азимутальной плоскости (б), измеренная в направлении максимума первого лепестка угломестной ДН при зависшем вертолете

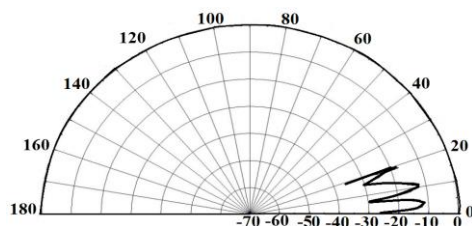


Рис. 13. ДН в вертикальной плоскости в секторе углов $0 \dots 20^\circ$, измеренная при вертикальном полете вертолета

Выводы. В процессе модернизации антенной решетки РЛС диапазона УКВ в радиотехническом направлении выполнено следующее:

- разработан и реализован новый тип излучателя антенной решетки в виде кольцевой антенны, обладающий более приемлемыми радиотехническими и весогабаритными характеристиками по их совокупности;
- разработан и реализован макет антенной решетки, обладающий улучшенными радиотехническими параметрами и возможностью удобной и скоротечной компоновки сворачивания излучателей антенной решетки при переводе ее в транспортное положение;
- теоретически исследована задача двухлучевого приема в условиях зеркального отражения от Земли и предложена эквивалентная модель приема с виртуальными приемными антеннами;
- на основе упомянутого теоретического исследования разработана и реализована методика определения параметров излучателей антенной решетки из наземных измерений в более компактной по протяженности зоне и с минимизацией погрешностей определения искомых параметров;
- разработано и реализовано новое устройство, обеспечивающее повышенную точность измерений параметров антенной решетки облетным методом;
- разработан и реализован новый способ измерений облетным методом, обеспечивающий снижение затрат на выполнение измерений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Մարկոսյան Մ.Վ. ՀՕՊ-ի գործերի տարաշարժունության մեծացման տեսանկյունից արդիական ռադարների ստեղծման որոշ հարցեր // Հանդես «Հայկական բանակ». – 2013. – 1-2 (75-76). – էջ 45-49:
2. Фрадин А.З. Антенно-фидерные устройства. – М.: Связь, 1977. – 440 с.
3. Жук М.С., Молочков Ю.Б. Проектирование антенно-фидерных устройств. – М.: Энергия, 1966. – 648 с.
4. Айзенберг Г.З. Антенны УКВ. – М.: Связь, 1977. – 384 с.
5. The measurements of parameters of UHF antenna array radiators / M.V. Markosyan, V.H. Avetisyan, A.A. Hovhannisyan, A.K. Aharonyan et al // Proc. Intern. Conf. on Microwave and THz Technologies and Wireless Communication. - Yerevan, Armenia, October 16-17, 2012. - P. 156-161.

6. Արտոնագիր № 2508Ա, ՀՀ: ՄԻկրոշերտային անտենա / **Ա. Մահակյան, Մ. Մարկոսյան, Ա. Հովհաննիսյան**: - Առաջնության թվ. 18.01.2011: Հրապարակման թվ. 25.04.2011:
7. **Аветисян В.Г.** Эквивалентная модель двухлучевого приема при зеркальном отражении от Земли // Вестник ГИУА. Серия “Информационные технологии, электроника, радиотехника”. – 2013. - Вып. 16, №2. - С. 82-92.
8. **Avetisyan V.H., Sargsyan A.A.** On the measurements of UHF antenna parameters by two antennas technique // Proc. Intern. Conf. on Microwave and THz Technologies and Wireless Communication. - Yerevan, Armenia, October 16-17, 2012. - P. 149-155.
9. Արտոնագիր № 2803Ա, ՀՀ: Շրջաթիռ եղանակով վերգետնյա անտենայի պարամետրերի չափման սարք / **Մ. Մարկոսյան, Վ. Ավետիսյան, Ա. Հովհաննիսյան, Ա. Ահարոնյան, Ա. Մարգարյան**: -Առաջնության թվ. 23.05.2013: Հրապարակման թվ. 29.01.2014:
10. Արտոնագիր № 2814Ա, ՀՀ: Ուղղաթիռի միջոցով վերգետնյա անտենայի ուղղորդվածության դիագրամի չափման եղանակ / **Մ. Մարկոսյան, Վ. Ավետիսյան, Ա. Նիկողոսյան, Ա. Մարգարյան**: - Առաջնության թվ. 23.05.2013: Հրապարակման թվ. 25.02.2014:

Ереванский НИИ Средств связи, Институт Математики и Высоких Технологий РАУ. Материал поступил в редакцию 10.04.2014.

**Մ.Վ. ՄԱՐԿՈՍՅԱՆ, Վ.Հ. ԱՎԵՏԻՍՅԱՆ, Ա.Ա. ՀՈՎՀԱՆՆԻՍՅԱՆ,
Ա.Կ. ԱՀԱՐՈՆՅԱՆ, Ա.Ի. ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ, Գ.Զ. ՍՈՒՂՅԱՆ**

**ՄԵՏՐԱՑԻՆ ԱԼԻՔՆԵՐԻ ՏԻՐՈՒՑԹԻ ՌԱԴԻՈԼՈԿԱՅԻՈՆ ԿԱՅԱՆԻ
ԱՆՏԵՆԱՑԻՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳԻ ԱՐԴԻԱԿԱՆԱՑՈՒՄ**

Ներկայացվում են մետրային ալիքների տիրույթի ռադիոլոկացիոն կայանի անտենային համակարգի արդիականացման հետազոտությունների արդյունքները և տեխնիկական լուծումները՝ ուղղված նրա ռադիոտեխնիկական պարամետրերը և շարժունակությունը բարձրացնելուն: Հետազոտվել են ռադիոտեխնիկական ուղղությամբ արդիականացման հարցերը:

Առանցքային բառեր. անտենային համակարգ, արդիականացում, ռադիոլոկացիոն կայան, մետրային ալիքների տիրույթ:

**M.V. MARKOSYAN, V.H. AVETISYAN, A.A. HOVHANNISYAN,
A.K. AHARONYAN, A.I. PETROSYAN, G.Z. SUGYAN**

**MODERNIZING THE ANTENNA SYSTEM OF A METER WAVEBAND RADAR
UNIT**

The results of investigations and technical solutions for modernizing the antenna system of a meter waveband radar unit aimed at increasing its radiotechnical parameters and mobility are presented. The issues of modernization in the sphere of radioengineering are investigated.

Keywords: antenna system, modernization, radar unit, meter waveband.

A.A. GEVORGYAN, A.M. BAGHDASARYAN, R.E. FATYAN

THERMAL AWARE DYNAMIC FREQUENCY SCALING FOR 3D IC

Thermal dissipation in 3D integrated circuits has become one of the most vital problems for this technology. The hardware and software approaches could be used to minimize the thermal dissipation issue. A dynamic frequency scaling based algorithm that allows to minimize the thermal energy concentration in a chip and keep the task execution deadline is introduced. Experimental results and comparison of algorithms are presented as well and show that the method allows to minimize the heat generation by 8%.

Keywords: 3D IC, DVFS, task scheduler.

Introduction. The number of semiconductor devices in ICs grows according to Moors law [1]. This leads to several problems in the design of ICs. The growing complexity of ICs requires more semiconductor devices and more die area to implement complicated architectures. The sizes of transistors decrease and the nano-scaling effects become more important [2]. The problem becomes more vital as the classical scaling mechanisms are not able to adapt to new technologies. Key parameters such as gate oxide thickness are no longer possible to scale down [2]. This means that the device off-state current has begun to creep up very fast. All these problems limit the possibility to increase the clocking speed of digital ICs. The value of the clock frequency for digital circuits can be increased but issues arise like heat generation during over clocking, error quantity, etc. This leads to the platforms with multiple cores that can be clocked with lower frequency but can perform parallel calculus, and in this way increase the total productivity of the system. The goal is to continue to increase the performance of the system by keeping a relatively low clock frequency (several *GHz*) and adding more cores to perform parallel operations. One of the problems that come up for such kind of platforms is the code parallelism. The software developers should design the programs so that the operations could be done in parallel, otherwise the code will be executed on one core and there would be no benefit from multicore architecture. There are several other problems, that are specific for most types of architectures like crosstalk noise, that become more important as the sizes of semiconductor devices become smaller and the density and total length of the wires grow [3]. The next problem is the signal propagation delays and signal sharpness [3]. The wire length plays a significant role in the signal timing and shape parameters and it's become critically important to minimize the signal propagation delays and preserve the form of the source signal. Then, for more complex

architectures, a larger die area is needed, so the size should be scaled as well. But the sizes of the die cannot be increased without any side effects. The first problem that arises during this procedure is that the number of defects grows in exponential order as the sizes of the chip grow. The defects can lead to disoperation of the semiconductor devices and the output can become unpredictable.

All the problems described above have a major influence on the chip sustainability and productivity and it becomes obvious that new solutions need to be developed to overcome the described issues.

One of the promising technologies is the three-dimensional integrated circuit (3D IC) which allows to improve the technology performance and minimize the side effects described above [4].

3D IC technology. Advantages and disadvantages. The 3D IC consists of several chips that are stacked together in the same package in a vertical direction. The typical 3D IC structure is shown in Fig. 1.

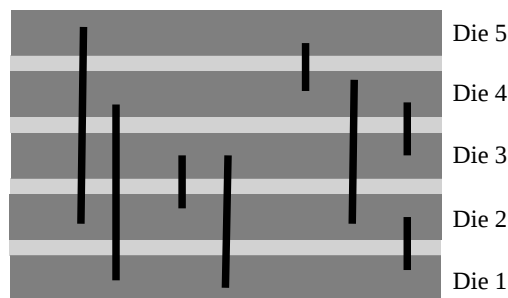


Fig. 1. General structure of 3D IC

This technology allows to have several layers of active logic connected to each other with vertical signaling vias. The benefits of this technology are: the shorter length of global interconnections, the interconnection bandwidth can be much larger compared to the traditional horizontal technology, latencies and propagation delays become much less and the signal edge sharpness is preserved. It also allows to integrate a large amount of low-latency cache memory into the chip structure, and by this to increase the performance of the chip [4]. 3D technology proposes a realistic way to maintain the progress defined by Moore's law.

With all the advantages described above, there are several disadvantages of such kind of architectures. As there are several active layers integrated in the same chip, and the higher integration assumes that more complex functionality is packed into one chip, the probability of a broken chip will be higher. Due to this, the yield percentage is less compared to traditional structures.

One of the most important problems that comes up in 3D IC is the thermal dissipation and heat generation in such structures.

Thermal dissipation problem in 3D IC. Layers in 3D IC have a stacked structure, and by this thermal energy is accumulated in the layers that are located far from the package. This energy must be effectively removed from the body of the chip, otherwise this can lead to heat concentration and finally the chip can become unusable. Several methods are proposed to solve this problem. In general, the methods can be classified into two main groups:

- IC design modifications (hardware approaches)
- Task scheduling methods (software approaches)

Each of these methods has its own submethods. There are three main methods that are used in case of hardware approach:

- Thermal aware floor planning
- Thermal aware placement
- Thermal via insertion

Each of these methods has its advantages and disadvantages. Thermal aware floor planning assumes that blocks in each layer are placed based on their thermal activity [5]. The goal is to avoid having thermal active blocks vertically in the same direction. Thermal aware placement performs the same operation for semiconductor devices [6]. During this procedure the vertical thermal pattern is also taken into account. The third method assumes insertion of special thermal vias [7]. During this operation thermal vias are placed in heat producing zones and drive heat energy from inner layers to upper layers and finally to the package. In general, there are possibly two types of thermal vias. In the first case, the vias connect only two nearby layers. The second approach is to use vias to connect several layers to one another.

The experimental results show that the most effective method is to place thermal vias [8]. But the disadvantage of this method is that it requires additional area for thermal vias to be placed.

Another issue is the behavior of the chip during the run time. As the chips are stacked together, the overall temperature is very dependent of the temperature of the stack in which the core is located. During the run time, the tasks have different thermal activities, and by this, the thermal profile of the system can vary during the task scheduling. To avoid overheating during the run time the thermal aware scheduling methods can be used, but the currently existing algorithms for thermal aware task scheduling have low performance and cannot be used in most cases.

Dynamic voltage and frequency scaling. One of the methods that is used to control heat generation in a chip is dynamic voltage and frequency scaling (DVFS) for the processor [9]. This is a widely used technique that is intended to reduce power consumption and heat generation in a wide range of devices like embedded systems, laptops, mobile phones and portable devices.

DVFS technique allows to reduce power consumption in CMOS ICs by reducing the supply voltage level and the operational frequency. To represent the power consumption of the processor, the following equation can be used (1):

$$P = CfV^2 + P_{Static}, \quad (1)$$

where C is the capacitance of transistor gates, f is the operational frequency, V is the supply voltage. The voltage value is determined by the frequency value, and is the minimal value at which the circuit is still operational. Therefore, the voltage value can be decreased by decreasing the value of operational frequency. This can lead to significant power minimization as the values for both variables V and f are minimized.

For most CMOS based processors, the frequency depends on the supply voltage and can be given by the following equation [10, 11]:

$$f = a \frac{(V_{dd} - V_t)^2}{V_{dd}}, \quad (2)$$

where V_{dd} is the supply voltage, f is the clock frequency, V_t is the threshold voltage, a is a constant. This equation can be rewritten:

$$f = kV_{dd}, \quad (3)$$

where k is a constant. Thus, frequency has a linear relation with the supply voltage.

By substituting the V value from (3) in (1):

$$P = \frac{C}{k^2} f^3, \quad (4)$$

which is equivalent to

$$P = qf^3, \quad (5)$$

where q is a constant.

As it can be seen, the power consumption is directly proportional to the cube of core frequency [12]. So it becomes obvious that the frequency scaling for 3D IC can have major effect to overcome the thermal dissipation problem.

There are several factors that influence the DVFS efficiency. Several of these factors are described below:

- memory performance,
- cash organization and hitting coefficient,
- sizes of the transistors,
- idle/sleep modes of the system,
- number of core and their complexity,
- clock domain structures.

All these aspects have different impacts on the efficiency of the DVFS technique. The DVFS was first proposed in 1994 when the transistor sizes were approximately

0.8 μm and the supply voltages 5 V. Also, the ratio of dynamic power to static power consumption was high. Since that time, the structure of computational systems has changed significantly. The size of transistors has decreased to 14 nm technology and by this the threshold voltage has decreased as well. This means that the efficiency of the DVFS method is reduced as the difference of idle and sleep modes is not so significant as before and the power saving will not be so efficient. The structure and performance of memory has changed as well. The bandwidth of the memory bus has increased and the performance of the memory read/write operations has also increased. This means that the number of the waiting cycles of the processor can be less than before and the efficiency of the frequency scaling is going down. The next point is the organization of the cash memory. In modern systems there are several layers of cash memory and the hit percentage is relatively high compared to the previous architectures. This will lead to the acceleration of the memory response, and the number of the idle cycles of the processor will be low. In addition to all this, the current architectures of computational systems assume more than one processor in the system and multitasking. Modern architectures have a performance-monitoring unit (PMU). Based on this memory requests per cycle and instructions per cycle models have been developed [13].

As can be seen from the discussion above there are several methods for DVFS implementation. However this method can be a good heat minimization technique for 3D IC. In this case there are several problems that need to be solved to ensure a good performance of this method and power saving.

Due to the specific structure of 3D IC the issues arising are as follows:

- more than one processor,
- strong thermal correlations in vertical direction between the heat sources,
- several clock domains.

In the following section, the algorithm allowing to perform DVFS for 3D IC based on the task scheduler aimed at decreasing the heat generation and concentration in the chip will be considered.

Methodology. In this section, the technique for performing DVFS for 3D IC is considered. Linux kernel governor is chosen as a basic governor structure. The governor should perform DVFS based on the thermal activity of the tasks and perform the task rescheduling to achieve an acceptable thermal profile for the processors' stack in 3D IC. The governor consists of two parts: the decision making logic, and the frequency scaling logic. The general structure is shown in Fig 2.

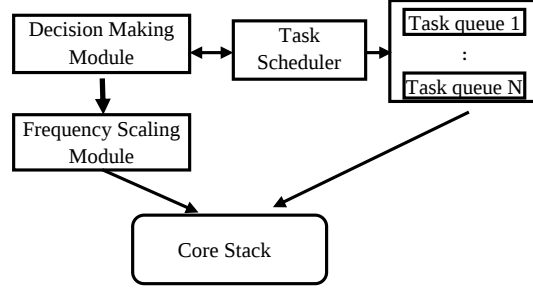


Fig. 2. DVFS governor structure of 3D IC

The overall system consists of the task scheduler and the DVFS modules. The scheduler is responsible for performing task assignment to the cores in one stack and rearrangement of tasks that are in active and waiting states based on feedback from the DVFS module.

The DVFS module is an always running module that performs monitoring of cores in a stack, and, based on thermal profile, performs the frequency scaling to keep the desired temperature value.

There are two possible methods of frequency scaling optimization:

- static slack optimization,
- dynamic slack optimization.

The proposed method uses static slack optimization. This technique uses the idle CPU time for performing a frequency scaling. When the CPU time requested by the application is less than 100%, there are time frames when the CPU is idle and this time can be used to perform frequency scaling and power saving. Fig. 3 illustrates this concept,

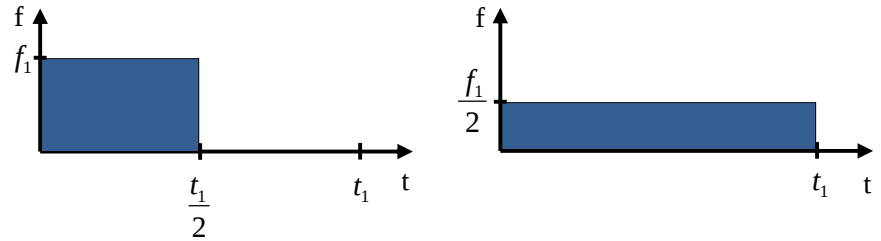


Fig. 3. Frequency scaling by CPU idle time

where t_1 is the deadline time for the task, f is the frequency. As can be seen, the idle time can be used to decrease the frequency value and, by that, decrease the power consumption. For the example in Fig. 3, the power saving calculation can be carried out based on (5) and will be 25%.

The algorithm performs selecting and rescheduling tasks based on the pending task list Table 1.

Table 1

Task execution and deadline times

Task	Execution time	Deadline
T_1	et_1	dt_1
T_2	et_2	dt_2
...	...	...
T_n	et_n	dt_n

When the temperature of a core increases and reaches the allowed threshold value, the DVFS module sends notification to DMM(Decision Making Module). The DMM performs the calculation of the target frequency to decrease the temperature of the core. Then it notifies the task scheduler to perform the rescheduling of the tasks so that the task with maximal allowed execution time for the newly calculated frequency value should be chosen.

Experiments show that the proposed DVFS governor allows to decrease the temperature of the stack and keep the allowed deadline for tasks. The algorithm sorts the task based on their run time and the deadline time. During the frequency scaling procedure the next task that is chosen is the one with the maximum allowed running time. The general structure of the algorithm is shown below:

1. Monitoring the temperature of a stack.
2. Indicating the cores with the temperature value near to the threshold level.
3. Calculating the desired frequency based on current power consumption.
4. Notifying the task scheduler to sort the pending task list and choose the task with a maximum admissible running time.
5. Scheduling the selected task for execution.
6. Going to step 1.

In the first step, a set of tasks to perform thermal simulation for the task scheduling procedure is selected. To ensure the best memory performance, all the test are carried out with a virtual file system created in RAM. As a task set SPEC CPU2006 benchmark is selected. It includes two types of benchmarks: integer and floating point.

The workflow of thermal aware task scheduler is based on temperature balancing for each stack. The tasks are chosen based on their thermal activity so that the total heat generation in one stack will not exceed the threshold value for the stack. The DVFS algorithm is performed based on the task priority and thermal activity. When the heat generation exceeds the threshold value, DVFS is performed. As DVFS decreases the core performance, it is necessary to perform the task rescheduling to achieve optimal performance. From this point of view, the task rescheduling is performed in two stages. At the first stage, the task rescheduling is done across the vertical stack, and if no possible option is found, rescheduling is done globally including other stacks one by one. It should be mentioned that this procedure requires

some time and if that time interval is larger than the task performing time, it is not effective and there is no reason to perform rescheduling. To overcome this problem and achieve a maximum performance for the task scheduling, all the tasks are stored in sorted order in queues. When rescheduling needs to be done, a binary search for the task queue can be performed and by this optimal time is achieved.

Experimental results. The experimental platform includes PCs with Intel I5 CPU that are connected to the network and are monitored from one controller unit. The selection of I5 cores allows to have many power states that are shown below in Table 2 [14]. These values describe the P-state of the processor.

Table 2

Power states of Intel i5 processor

Power state	Frequency in MHz
P ₀	2400
P ₁	2399
P ₂	2266
P ₃	2133
P ₄	1999
P ₅	1866
P ₆	1733
P ₇	1599
P ₈	1466
P ₉	1333
P ₁₀	1199

The controller software simulates the 3D IC thermal model based on the data from the client machines. The Linux kernel is used as a basic software environment. To simulate the thermal effects, a modified version of HotSpot software is used. It allows to simulate the thermal profile based on the data collected from client systems. For the task simulation, SPEC CPU2006 is used. It contains a large variety of benchmark tests with different thermal profiles. In HotSpot the i5 processor is used to simulate one layer of 3D IC. The experimental results are shown in Table 3. In average, after performing frequency scaling the temperature is reduced by 8%.

Table 3

Power states of Intel i5 processor

Benchmark type	T _{avg} w/o DVFS	T _{avg} with DVFS
Int arithmetic	33.74	31.04
Floating point arithmetic	49.0	45.08
Dynamic memory allocation/freeing	36.68	33.13
Iterative counting	37.1	34.1
Recursive counting	37.52	34.28

Conclusion. In this article, a method for the dynamic voltage and frequency scaling and the thermal aware task scheduling for 3D IC is considered. An algorithm for performing DVFS and rescheduling tasks to keep the optimal performance of the system is proposed. To maintain the system performance during a low frequency period, task rescheduling is carried out. The rescheduling procedure is done in two phases: at first it is done in a core stack, if no possible solution can be found, rescheduling is performed by including other stacks and, by this, keeping the minimal number of the task switching. Experimental results show that by using the proposed DVFS with the thermal aware task scheduling allows to minimize heat generation by 8%. This method can also be used for multi-core dies.

REFERENCES

1. <http://www.intel.com/content/www/us/en/history/museum-gordon-moore-law.html>
2. Scaling, power, and the future of CMOS / **M. Horowitz, E. Alon, D. Patil et al** // IEEE Intl. Electron Devices Meeting, IEDM Technical Digest.- Washington, DC, Dec. 2005.- USA.- P. 9-15.
3. **Kahng A.B., Muddu S. and Vidhani D.** Noise and delay uncertainty studies for coupled rc interconnect // Proceedings of ASIC/ SOC Conference.- 1999. –P. 3–8.
4. **Yuan X., Jason C., Sachin S.** Three-Dimensional Integrated Circuit Design Series: Integrated Circuits and Systems.- Springer, 2009.
5. Interconnect and thermal-aware floorplanning for 3D microprocessors / **W. L. Hung, G. M. Link, Y. Xie, et al** // Proc. Intl. Symp. Quality of Electronic Design,- March 2006.- P. 98-104.
6. **Jason C., Guojie L., Jie W. and Yan Z.** Thermal-aware 3D IC Placement Via Transformation //Proc of ASP-DAC.- 2007.- P.780-785.
7. **Sapatnekar S. and Goplen B.** Placement of 3D ICs with thermal and inter-layer via considerations // Design Automation Conference.- June 2007.- P. 626-631.
8. **Brent Goplen, Sachin S. Sapatnekar.** Placement of Thermal Vias in 3-D ICs Using Various Thermal Objectives // IEEE Transactions on computer-aided design of integrated circuits and system. - Apr.2006.- Vol. 25, no. 4.
9. **Graybill R. and Melhem R.** Power Aware Computing.- Kluwer Academic/Plenum Publishers, 2002.
10. **Martin T.L.** Balancing batteries, power, and performance: system issues in CPU speed-setting for mobile computing: PhD thesis, Carnegie Mellon University.- Pittsburgh, PA, USA, 1999.
11. **Weissel A., Bellosa F.** Process cruise control. Event-driven clock scaling for dynamic power management //CASES.- Grenoble, France, Oct 8–11 2002.
12. **Snowdon D. C.** OS-Level Power Managemen: PhD thesis, School Comp. Sci. & Engin., University NSW.- Sydney, 2010.
13. Advanced configuration and power interface specification / **HP, Intel, et al.**- 2011.
14. <http://www.intel.com>

Synopsys Armenia CJSC. The material is received 10.04.2014.

Ա.Ա. ԳԵՎՈՐԳՅԱՆ, Ա.Մ. ԲԱՂԴԱՍԱՐՅԱՆ, Ռ.Է. ՖԱՏՅԱՆ

**ԵՌԱՉԱՓ ԻՆՏԵԳՐԱԼ ՄԽԵՄԱՆԵՐՈՒՄ ՋԵՐՄՈՒԹՅԱՆ ՆՎԱԶԵՑՄԱՆՆ
ՈՒՂՂՎԱԾ ՀԱՃԱԽՈՒԹՅԱՆ ԴԻՆԱՄԻԿ ՄԱՇՏԱԲԱՎՈՐՈՒՄ**

Եռաչափ ինտեգրալ սխեմաներում ջերմային ցրումը դարձել է այս տեխնոլոգիայի հիմնական խնդիրներից մեկը: Վերջինիս ազդեցությունը նվազեցնելու համար օգտագործվում են սարքային և ծրագրային մեթոդներ: Ներկայացված մեթոդը հիմնված է հաճախականության դինամիկ մասշտաբավորման վրա և թույլ է տալիս նվազեցնել ջերմային էներգիայի կուտակումը միկրոսխեմայի կառուցվածքում⁸ ապահովելով խնդրի կատարման վերջնաժամկետը: Ներկայացված են փորձնական արդյունքները և ալգորիթմների համեմատությունը: Ցույց է տրված, որ կիրառված մեթոդը թույլ է տալիս ապահովել ջերմային էներգիայի կուտակման նվազեցում 8%-ով:

Առանցքային բառեր. եռաչափ ինտեգրալ սխեմա, լարման և հաճախության դինամիկ մասշտաբավորում, խնդիրների պլանավորիչ:

Ա.Ա. ГЕВОРКЯН, А.М. БАГДАСАРЯН, Р.Э. ФАТЯН

**ДИНАМИЧЕСКОЕ МАСШТАБИРОВАНИЕ ЧАСТОТЫ ДЛЯ МИНИМИЗАЦИИ
ТЕМПЕРАТУРЫ В ТРЕХМЕРНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМАХ**

Концентрация термальной энергии в трехмерных интегральных микросхемах является одной из важнейших проблем этой технологии. Для минимизации проблемы концентрации термальной энергии используются аппаратные и программные методы. Представлен метод, основанный на масштабировании частоты синхросигнала и позволяющий минимизировать концентрацию термальной энергии в структуре микросхемы и в то же время не превысить лимит времени выполнения задания. Проведен анализ экспериментальных результатов и дано сравнение алгоритмов. Показано, что данный метод позволяет сократить генерацию термальной энергии на 8%.

Ключевые слова: трехмерная интегральная схема, динамическое масштабирование напряжения и частоты, планировщик задач.

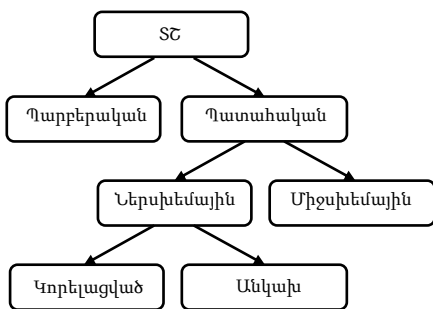
Կ.Պ. ՍԼՈՅԱՆ

ԹՎԱՅԻՆ ԻՆՏԵԳՐԱԼ ՄԽԵՄԱՆԵՐԻ ՎԻՃԱԿԱԳՐԱԿԱՆ ՎԱՐՔԸ ՎԵՐԱՐՏԱԴՐՈՂ ԵՂԱՆԱԿ

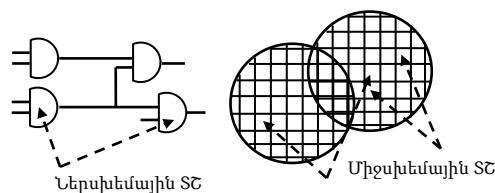
Առաջարկվել է թվային ինտեգրալ սխեմաների (ԻՍ) տարրերի ժամանակային պարամետրերի տեխնոլոգիական շեղումները հաշվի առնող վիճակագրական ժամանակային վերլուծության եղանակ, որը հնարավորություն է տալիս զգալիորեն մեծացնել ժամանակային ստուգման արդյունքների ճշտությունը՝ դրանց ստացման համար պահանջվող մեքենայական ժամանակի ծախսի ոչ էական աճով:

Առանցքային բառեր. ժամանակային պարամետրեր, վիճակագրական ժամանակային վերլուծություն, ժամանակային հապաղում:

Ներածություն: ԻՍ-երի նախագծման երկրաչափական չափերի շարունակական նվազեցումը հանգեցնում է ենթամիկրոնային տեխնոլոգիաներում առկա ԻՍ-երի տարրերի պարամետրերի վրա զգալի ազդեցություն ունեցող տեխնոլոգիական շեղումների (ՏՇ) էական աճի՝ ԻՍ-երի նախագծման և դրանց ընթացքում կատարվող ժամանակային վերլուծության բավարար ճշտությամբ արդյունքների ստացման գործընթացի բարդացմանը զուգընթաց: Եթե ԻՍ-երի արտադրման տեխնոլոգիական չափերի մեծ արժեքների դեպքում (130 նմ, 180 նմ և այլն) ներսխեմային շեղումների (նկ. 1,2) [1,2] հետևանքով դրանցում առկա տարրերի պարամետրերը կարող էին շեղվել իրենց իրական արժեքներից ընդամենը 10%-ով, ապա ենթամիկրոնային (65 նմ, 45 նմ և այլն) տեխնոլոգիաներում այդ շեղումներն ավելի քան 50% են, այսինքն՝ ՏՇ-երի հաշվի չառնելը ուղղակի անթույլատրելի է:



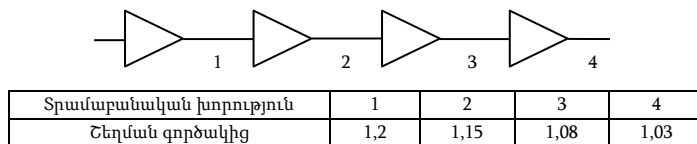
Նկ. 1. ՏՇ-երի դասակարգումը



Նկ. 2. Ներսխեմային և միջսխեմային ՏՇ-երը

ՏՇ-երի շարունակական աճը հանգեցնում է նաև թվային ԻՍ-երում առկա տարրերի ժամանակային հապաղումների շեղման զգալի մեծացման՝ առաջացնելով

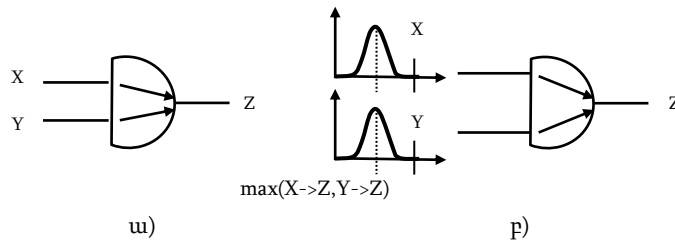
ինչպես քանակական, այնպես էլ որակական սխալներ: Եթե առաջին դեպքում նվազում է ԻՄ-երի արագագործությունը, ապա երկրորդ դեպքում ստացվում են սխեմայի հանգույցներում սպասվող ազդանշանի ոչ ճշգրիտ արժեքներ: Այդ պատճառով անհրաժեշտություն է առաջացել կիրառելու այնպիսի միջոցներ, որոնք հաշվի կառնեն ՏՇ-երի ազդեցությունը թվային ԻՄ-երի տարրերի ժամանակային պարամետրերի վրա և կիրականացնեն ժամանակային վերլուծություն ընդունելի ժամանակում՝ ապահովելով ստացվող արդյունքների բավարար ճշտություն: Նման միջոցների թվին է պատկանում ստատիկ ժամանակային վերլուծության եղանակը [3,4], որը վերջին ժամանակներում դարձել է թվային ԻՄ-երի ժամանակային պարամետրերի գնահատման հիմնական մեթոդը, քանի որ դրանցում առկա տրամաբանական տարրերի քանակի աճի (ներկայումս՝ 10^6 կարգի) հետ այս մեթոդի ծախսած ժամանակն աճում է գծայնորեն: Այս մեթոդի դեպքում ներսխեմային ՏՇ-երը հաշվի առնելու նպատակով օգտագործվում են շեղման գործակիցներ, և սխեմայի տարրերի հապադումները բազմապատկվում են դրանցով [3], ընդ որում, այդ գործակիցները որոշվում են ժամանակային ուղում տարրի տրամաբանական խորությունից (նկ. 3) [5]:



Նկ. 3. Տարրի տրամաբանական խորությունից կախված շեղման գործակցի արժեքը

Այս մեթոդը գործնականում դարձել է ոչ այդքան կիրառելի, քանի որ միջսխեմային ՏՇ-երը (նկ. 1,2) [1,2] հաշվի առնելու համար կրկին պահանջվում են մեծ ժամանակային ծախսեր՝ կատարելով ստուգումներ մեծ թվով սահմանային դեպքերի համար: Այդ պատճառով ՏՇ-երի աճին զուգընթաց, դրանք հաշվի առնելու դեպքում ավելի մեծ ճշտությամբ արդյունքներ ատանալու նպատակով, կիրառվում են վիճակագրական ստուգումներ իրականացնող ծրագրային միջոցներ:

Վիճակագրական ստատիկ ժամանակային վերլուծություն: Ի տարբերություն ստատիկ ժամանակային վերլուծության, այս մեթոդն իրականացնում է ժամանակային հապադումների վիճակագրական վերլուծություն՝ կատարելով վիճակագրական տվյալների առավելագույնի և գումարման գործողություններ (նկ. 4) [1,4]: Բայց, եթե երկու և ավելի Գաուսյան բաշխվածությունների վիճակագրական գումարը միշտ Գաուսյան բաշխվածություն է [6], ապա դրանց առավելագույնի արդյունքը Գաուսյան չէ, քանի որ վիճակագրական տվյալների առավելագույնը ոչ գծային օպերատոր է:



Նկ. 4. Ստատիկ (ա) և վիճակագրական ստատիկ (բ) ժամանակային վերլուծության դեպքում առավելագույնի գործողությունը

Այս մեթոդի դեպքում բավարար ճշտությամբ արդյունքներ ստանալու համար վիճակագրական առավելագույնի գործողության մոտարկումից զատ անհրաժեշտ է հաշվի առնել նաև թվային ԻՄ-երում առկա կառուցվածքային և տարածական կորելյացիաները [1,2,4], որոնք կարևոր դեր են խաղում հատկապես ներսխեմային ՏՇ-երը մոդելավորելիս:

Թվային ԻՄ-երի վիճակագրական վարքը վերարտադրող եղանակի մշակումը:

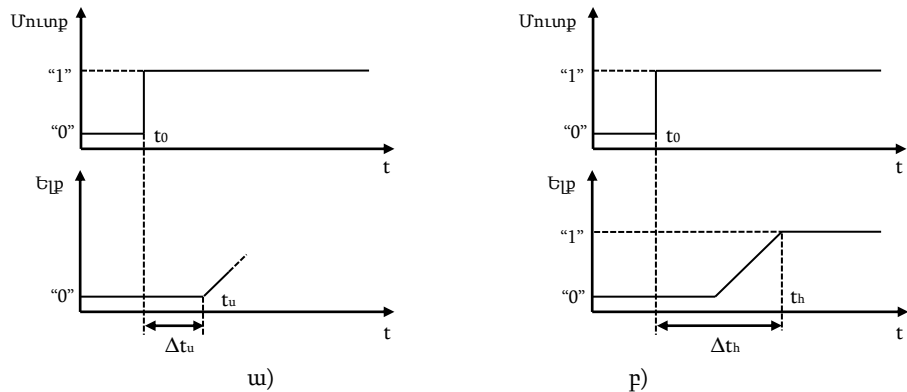
Թվային ԻՄ-երի նախագծման տարբեր փուլերում իրականացվող նախորդ երկու ժամանակային վերլուծության միջոցներում գնահատվում են ԻՄ-երի հանգույցներում ազդանշանների հապաղումները՝ հաշվի առնելով առանձին տարրերի հապաղումները: Ի տարբերություն դրանց, այստեղ առաջարկվող եղանակում տարրերի հապաղումների փոխարեն դիտարկվում են դրանց ժամանակային վարքը բնութագրող հետևյալ ժամանակային պարամետրերը [7]՝

- Δt_u – տարրի մուտքային ազդանշանի փոխանջատման պահի և ելքային ազդանշանի վիճակի փոփոխման սկզբի միջև ընկած ժամանակահատված (նկ. 5ա),
- Δt_h – տարրի մուտքային ազդանշանի փոխանջատման պահի և ելքային ազդանշանի հաստատման միջև ընկած ժամանակահատված (նկ. 5բ):

Ընդհանուր դեպքում, ժամանակային վերլուծության ճշտության մեծացման նպատակով նշված ժամանակային պարամետրերը դիտարկվում են ազդանշանի ինչպես “0”->”1”, այնպես էլ “1”->”0” փոխանջատումների դեպքում՝ Δt_u^{01} , Δt_u^{10} , Δt_h^{01} և Δt_h^{10} : Թվային տարրերի սխեմատիկական մակարդակի մոդելավորման և ժամանակային վերլուծության բազմաթիվ փորձերի արդյունքում դիտարկվող ժամանակային պարամետրերի համար ստացվել է հետևյալը [7]՝

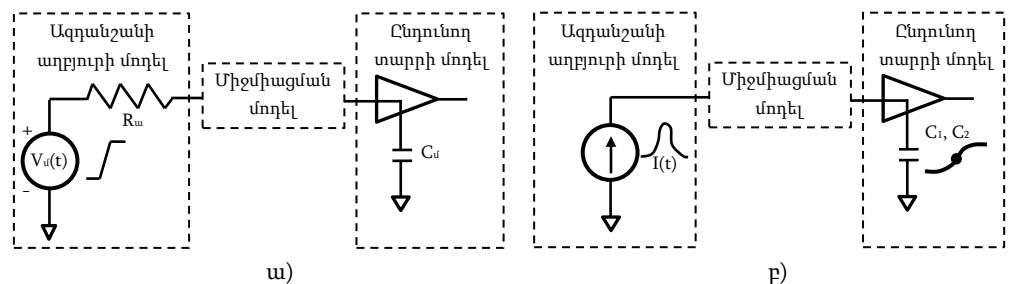
$$\begin{cases} \Delta t_u^{01} = t_{\text{տրծ}}^{01} - 0,625 * t_{\Delta}^{01}, \\ \Delta t_h^{01} = t_{\text{տրծ}}^{01} + 0,625 * t_{\Delta}^{01}, \end{cases} \text{ և } \begin{cases} \Delta t_u^{10} = t_{\text{տրծ}}^{10} - 0,625 * t_{\Delta}^{10}, \\ \Delta t_h^{10} = t_{\text{տրծ}}^{10} + 0,625 * t_{\Delta}^{10}, \end{cases} \quad (1)$$

որտեղ $t_{\text{տրծ}}^{01}$, $t_{\text{տրծ}}^{10}$ –ը տարրում ազդանշանի տարածման հապաղումն է, իսկ t_{Δ}^{01} , t_{Δ}^{10} –ը՝ դրանց ելքային ազդանշանի փոխանջատման տևողությունը՝ համապատասխանաբար “0”->”1” և “1”->”0” փոխանջատումների դեպքում [7,8]:



Նկ. 5. Թվային տարրի Δt_u (ա) և Δt_h (բ) ժամանակային պարամետրերի սահմանումը

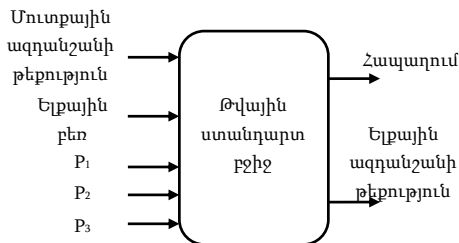
Բայց քանի որ թվարկված $t_{\text{տրծ}}^{01}$, $t_{\text{տրծ}}^{10}$, t_{Δ}^{01} և t_{Δ}^{10} հապաղումները թվային ԻՄ-երի նախագծման հիմնական մաս կազմող թվային ստանդարտ գրադարանի յուրաքանչյուր տարրի համար ստանալու դեպքում պահանջվում են մեքենայական ժամանակի անթույլատրելի մեծ ծախսեր, ուստի առաջարկվող եղանակում յուրաքանչյուր տարրի Δt_u և Δt_h ժամանակային պարամետրերը որոշվել են թվային ստանդարտ տարրերի բնութագրման արդյունքների հիման վրա: Թվային տարրերի բնութագրումը, կախված դրանց նախագծման տեխնոլոգիական չափերից, իրականացվում է ժամանակային հապաղման տարբեր մոդելներով: Եթե մեծ չափերի դեպքում (130 նմ, 180 նմ և այլն) դա իրականացվում է ոչ գծային հապաղման մոդելներով (նկ. 6ա) [3,9]՝ արդյունքում ստանալով թվային տարրերի ժամանակային հապաղումները՝ կախված դրանց մուտքային ազդանշանի փոխանջատման տևողությունից և ելքի ունակային բեռից, ապա ենթամիկրոնային տեխնոլոգիաներում (65 նմ, 45 նմ, 22 նմ և այլն) այդ մոդելները, չապահովելով բավարար ճշտություն, փոխարինվում են համակցված հոսանքի աղբյուրի մոդելներով (նկ. 6բ) [9], որոնց միջոցով ստացված բնութագրման արդյունքները փոխակերպվում են ոչ գծային հապաղման մոդելների միջոցով իրականացված բնութագրման [9]:



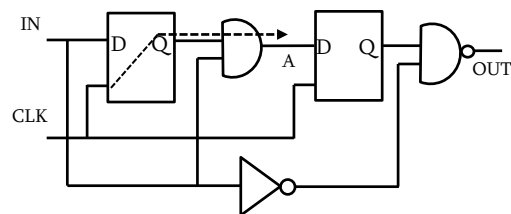
Նկ. 6. Ոչ գծային հապաղման (ա) և համակցված հոսանքի աղբյուրի (բ) մոդելները

Բայց, քանի որ առաջարկվող եղանակն իրականացնում է վիճակագրական ժամանակային վերլուծություն՝ հաշվի առնելով ՏՇ-երի ազդեցությունը թվային ԻՄ-երի տարրերի ժամանակային պարամետրերի վրա, ուստի դրանց բնութագրման արդյունքում ստացվող ժամանակային հապաղումները պետք է կախված լինեն ինչպես տարրի ելքային բեռից և մուտքային ազդանշանի փոխանջատման տևողությունից, այնպես էլ դիտարկվող տեխնոլոգիական պարամետրերից (P_1, P_2, P_3) (նկ. 7):

Այսպիսով, թվային տարրերի վիճակագրական բնութագրման արդյունքում, ունենալով մուտքային ազդանշանի փոխանջատման տևողությունից, ելքային բեռից և տեխնոլոգիական պարամետրերից աղյուսակային կախվածություններ ունեցող $t_{\text{տրծ}}^{01}, t_{\text{տրծ}}^{10}, t_{\Delta}^{01}$ և t_{Δ}^{10} ժամանակային հապաղումները, յուրաքանչյուրի համար հաշվվում են $\Delta t_u^{01}, \Delta t_u^{10}, \Delta t_b^{01}$ և Δt_b^{10} ժամանակային պարամետրերը՝ հաշվի առնելով (1)-ը: Առաջարկվող ժամանակային վերլուծության ելքում, դիտարկվող ժամանակային պարամետրից կախված, թվային ԻՄ-ի տարրերի բնութագրման արդյունքում ստացվող $[t_{\text{տրծ}}^{01}, t_{\text{տրծ}}^{10}]$ հապաղումները համապատասխանաբար փոխարինվում են $[\Delta t_u^{01}, \Delta t_u^{10}]$ կամ $[\Delta t_b^{01}, \Delta t_b^{10}]$ ժամանակային պարամետրերի գույգերից մեկով: Հաշվի առնելով ժամանակային նոր պարամետրերով լրացված վիճակագրական բնութագրման արդյունքը, տվյալ թվային ԻՄ-ի համար իրականացվում է վիճակագրական ստատիկ ժամանակային վերլուծություն, որի արդյունքում ստացվում են դրա ժամանակային պարամետրերի հավանականային բաշխվածությունները՝ հաշվի առնելով ՏՇ-երի ազդեցությունը դիտարկվող ժամանակային պարամետրերի վրա:



Նկ. 7. Թվային ստանդարտ բջիջի ժամանակային հապաղման մոդելը



Նկ. 8. Թվային սխեմա

Առաջարկվող եղանակն իրականացվել է թվային սխեմայի (նկ. 8) դեպքում: Այս սխեմայի տարրերի վիճակագրական բնութագրումն իրականացվել է 40 նմ տեխնոլոգիայով նախագծված թվային ստանդարտ տարրերի գրադարանի հիման վրա, և որպես տեխնոլոգիական պարամետրեր դիտարկվել են տարրերի ՄՕԿ դաշտային տրանզիստորների V_2 շեմային լարումը և L հոսքուղու երկարությունը: Liberty-NCX [9] ծրագրային գործիքի միջոցով իրականացված բնութագրման արդյունքում ստացվել են $t_{\text{տրծ}}^{01}, t_{\text{տրծ}}^{10}, t_{\Delta}^{01}$ և t_{Δ}^{10} ժամանակային հապաղումները յուրաքանչյուր տարրի համար՝ հաշվի առնելով դիտարկվող տեխնոլոգիական պարամետրերի նումինալ արժեքներից շեղումները (աղ. 1): Նկատի ունենալով տարրերի բնութագրման արդ-

յունքների ծավալները, այստեղ բերված են միայն “ԵՎ” տարրի հապաղումների 4x4-չափանի մատրիցները (աղ. 2...5)՝ շեմային լարման նոմինալ (0,281 Վ) և հոսքուղու երկարության 20% շեղման (32 նմ) արժեքների դեպքում:

Աղյուսակ 1

Տեխնոլոգիական պարամետրերի արժեքները և շեղումները

	ՄՕԿ տրանզիստորի շեմային լարում, Վ	ՄՕԿ տրանզիստորի հոսքուղու երկարություն, նմ
Նոմինալ արժեք	0,281	40
Շեղման չափ	$\pm 0,0562$ (20%)	± 8 (20%)

Աղյուսակ 2

$t_{տրծ}^{01}$ հապաղումը

	Մուտքային ազդանշանի փոխանցատման տևողություն, պվ			
Ելքային բեռ, ՖՃ	20	30	50	100
0,4	15,738	19,101	24,277	33,380
1	17,050	20,766	26,532	36,786
4	22,961	27,265	35,365	49,989
10	34,597	38,957	47,592	67,595

Աղյուսակ 3

$t_{տրծ}^{10}$ հապաղումը

	Մուտքային ազդանշանի փոխանցատման տևողություն, պվ			
Ելքային բեռ, ՖՃ	20	30	50	100
0,4	15,544	16,980	23,462	36,222
1	18,244	20,011	27,122	39,776
4	22,247	24,563	33,867	47,323
10	28,484	31,862	45,127	64,054

Աղյուսակ 4

t_{Δ}^{01} հապաղումը

	Մուտքային ազդանշանի փոխանցատման տևողություն, պվ			
Ելքային բեռ, ՖՃ	20	30	50	100
0,4	9,967	12,879	18,126	28,933
1	11,205	13,811	19,501	30,917
4	18,628	20,160	24,789	38,726
10	35,881	35,721	37,964	49,370

Աղյուսակ 5

t_{Δ}^{10} հապաղումը

	Մուտքային ազդանշանի փոխանցատման տևողություն, պվ			
Ելքային բեռ, ՖՃ	20	30	50	100
0,4	9,772	12,193	16,092	24,797
1	11,170	13,400	17,670	26,889
4	18,772	20,072	24,364	35,636
10	35,926	35,973	38,061	48,619

Հաշվի առնելով (1)-ը և վիճակագրական բնութագրման արդյունքները՝ հաշվվել է $[\Delta t_u^{01}, \Delta t_u^{10}]$ և $[\Delta t_h^{01}, \Delta t_h^{10}]$ զույգերից յուրաքանչյուրը՝ արդյունքում ստանալով նմանատիպ կախվածություններ (աղ. 6...9): Օրինակ, Δt_u^{01} պարամետրը հաշվելու համար $t_{տրծ}^{01}$ և t_{Δ}^{01} հապաղումների աղյուսակներից համապատասխանաբար ընտրվում են շրջանակների մեջ վերցված 15,738 պվ և 9,967 պվ արժեքները և տեղադրելով $\Delta t_u^{01} = t_{տրծ}^{01} - 0,625 \cdot t_{\Delta}^{01}$ հավասարման մեջ Δt_u^{01} ժամանակային պարամետրի համար ստացվում է 9,509 պվ (աղ. 6): Նման մոտեցմամբ շարունակելով լրացվում են բոլոր աղյուսակները համապատասխան ժամանակային պարամետրերի արժեքներով (աղ. 7...9):

Ստացվում է “ԵՎ” տարրի բնութագրման ելքային արդյունքը՝ լրացված Δt_u^{01} , Δt_u^{10} , Δt_h^{01} և Δt_h^{10} ժամանակային պարամետրերով: Այս օրինակում վիճակագրական

Ժամանակային վերլուծության արդյունքում դիտարկվել է Δt_h ժամանակային պարամետրը, ուստի “ԵՎ” տարրի վիճակագրական բնութագրման արդյունքում աղ. 8-ը և 9-ը փոխարինվել են համապատասխանաբար աղ. 2-ով և 3-ով:

Աղյուսակ 6

Δt_{ω}^{01} Ժամանակային պարամետրը				
	Մուտքային ազդանշանի փոխանջատման տևողություն, <i>պվ</i>			
Ելքային բեռ, <i>ՖՖ</i>	20	30	50	100
0,4	9,509	11,052	12,948	15,297
1	10,047	12,134	14,344	17,463
4	11,319	14,665	19,872	25,785
10	12,171	16,631	23,865	36,739

Աղյուսակ 7

Δt_{ω}^{10} Ժամանակային պարամետրը				
	Մուտքային ազդանշանի փոխանջատման տևողություն, <i>պվ</i>			
Ելքային բեռ, <i>ՖՖ</i>	20	30	50	100
0,4	9,4365	9,359	13,405	20,724
1	11,263	11,636	16,078	22,970
4	10,515	12,018	18,640	25,051
10	6,030	9,379	21,339	33,667

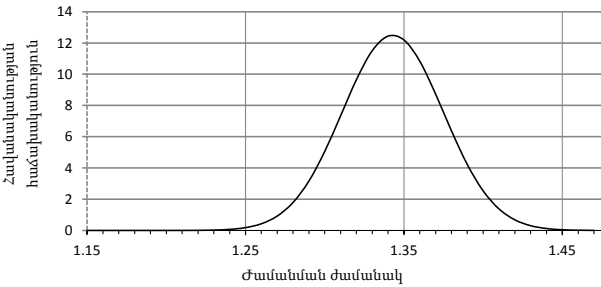
Աղյուսակ 8

Δt_h^{01} Ժամանակային պարամետրը				
	Մուտքային ազդանշանի փոխանջատման տևողություն, <i>պվ</i>			
Ելքային բեռ, <i>ՖՖ</i>	20	30	50	100
0,4	21,968	27,150	35,606	51,463
1	24,053	29,398	38,720	56,109
4	34,604	39,865	50,858	74,193
10	57,023	61,283	71,320	98,451

Աղյուսակ 9

Δt_h^{10} Ժամանակային պարամետրը				
	Մուտքային ազդանշանի փոխանջատման տևողություն, <i>պվ</i>			
Ելքային բեռ, <i>ՖՖ</i>	20	30	50	100
0,4	21,652	24,601	33,520	51,720
1	25,225	28,386	38,166	56,582
4	33,980	37,108	49,095	69,596
10	50,938	54,345	68,915	94,441

Նույն հաշվարկները և ժամանակային պարամետրերի փոխարինումները կատարվել են նաև սխեմայում առկա (նկ. 8) մյուս տարրերի դեպքերում: Մխեմայի բոլոր տարրերի համար ստանալով վիճակագրական բնութագրման արդյունքը, PrimeTime-VX ծրագրային գործիքի միջոցով [10] իրականացվել է վիճակագրական ստատիկ ժամանակային վերլուծություն՝ հաշվի առնելով սխեմայի վրա դրվող ժամանակային պահանջները, և դիտարկվող թվային սխեմայի կետագծերով նշված ժամանակային ուղու A հանգույցում (նկ. 8) ազդանշանի ժամանման ժամանակի համար ստացվել է հետևյալը (նկ. 9):



Նկ. 9. Թվային սխեմայի A հանգույցում ժամանման ժամանակի հավանականային բաշխվածությունը

Առաջարկվող եղանակը նույն մեթոդիկայով կիրառվել է նաև ISCAS-85 թեստային շարքի մի քանի իրական թվային սխեմաների դեպքում, և ստացված արդյունքները համեմատվել են լայն տարածում գտած սխեմատեխնիկական մոդելավորման HSPICE [11] ծրագրի և տարրերի հապաղումները հաշվի առնող PrimeTime-VX [10] միջոցի հետ (աղ. 10...12):

Աղյուսակ 10

Δt_u ժամանակային պարամետրի համեմատումը հապաղման հետ

Մխենա	Հապաղում, <i>պվ</i>		Δt_u , <i>պվ</i>	HSPICE-ի նկատմամբ, %	PrimeTime-VX-ի նկատմամբ, %
	HSPICE	PrimeTime-VX	Առաջարկվող		
c499	785	756	602	23,3	20,4
c880	1281	1238	989	22,8	20,1
c1908	1464	1417	1135	22,5	20
c2670	1886	1837	1483	21,4	19,3
Միջինը				22,5	19,9

Աղյուսակ 11

Δt_h ժամանակային պարամետրի համեմատումը հապաղման հետ

Մխենա	Հապաղում, <i>պվ</i>		Δt_h , <i>պվ</i>	HSPICE-ի նկատմամբ, %	PrimeTime-VX-ի նկատմամբ, %
	HSPICE	PrimeTime-VX	Առաջարկվող		
c499	785	756	611	22,1	19,2
c880	1281	1238	1002	21,8	19,1
c1908	1464	1417	1173	19,9	17,2
c2670	1886	1837	1518	19,5	17,4
Միջինը				20,8	18,2

Աղյուսակ 12

Առաջարկվող եղանակի արագագործության համեմատումը արդի միջոցների արագագործության հետ

Մխենա	Աշխատանքային ժամանակ, <i>ր</i>			HSPICE-ի նկատմամբ, %	PrimeTime-VX-ի նկատմամբ, %
	HSPICE	PrimeTime-VX	Առաջարկվող		
c499	23,3	19,4	20,2	13,3	4,1
c880	37,4	30,6	32,7	11,2	6,9
c1908	77,1	67,8	72,9	5,4	7,5
c2670	91,4	77,6	84,2	7,9	8,5
Միջինը				9,5	6,8

Այսպիսով, թվային ԻՍ-երի վիճակագրական վարքը վերարտադրող առաջարկվող եղանակը մի շարք իրական թվային սխեմաների դեպքում կիրառելիս ժամանակային վերլուծության առկա միջոցների համեմատ ապահովում է ստացվող արդ-

յունքների հաշվարկի ճշտության 22%-ով մեծացում՝ դրանց ստացման համար անհրաժեշտ մեքենայական ժամանակի ծախսի ընդամենը 8%-ով կորստի պարագայում:

Եզրակացություն: Առաջարկված է թվային ԻՍ-երի վիճակագրական վարքը վերարտադրող եղանակ, որը թույլ է տալիս իրականացնել վիճակագրական ժամանակային վերլուծություն՝ հաշվի առնելով դրանց տարրերի ժամանակային պարամետրերի ՏՇ-երը: Մշակված եղանակը ժամանակային վերլուծության առկա միջոցների համեմատ ապահովում է ստացվող արդյունքների ճշտության մոտ 22%-ով ավելացում՝ դրանց ստացման համար անհրաժեշտ մեքենայական ժամանակի ծախսի ընդամենը 8%-ով կորստի դեպքում:

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. Statistical Timing Analysis: From Basic Principles to State of the Art / **D. Blaauw, K. Chopra, A. Srivastava et al** // IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems. - 2008. - V. 27. - P. 589-607.
2. **Zang N., Park E., Kim J.** Efficient Cell Characterization for SSTA // IEEE Asia Pacific Conference on Circuits and Systems. - 2008. - P. 1012-1015.
3. **Bhatnagar H.** Advanced ASIC Chip Synthesis Using Synopsys Design Compiler Physical Compiler and PrimeTime. - Springer, 2001. - 360 p.
4. **Forzan C., Pandini D.** Why We Need Statistical Static Timing Analysis // IEEE International Conference on Computer Design. - Lake Tahoe, 2007. - P. 91-96.
5. **Walia S.** PrimeTime Advanced OCV Technology: Easy-to-Adopt, Variation-Aware Timing Analysis for 65-nm and below // White Paper. - 2009. - P. 1-9.
6. **Короленко П.** Основы статистических методов в оптике. - Университетская книга, 2010. - 163 с.
7. **Меликян В.Ш.** Теория моделирования и оптимизации цифровых схем с учетом дестабилизирующих факторов: Монография. - Ереван: Издательство ГИУА "Чартарагет", 2011. 346 с.
8. **Backer J.** CMOS Circuit Design, Layout and Simulation. - Series on Microelectronic Systems. - Willey IEEE Press, - 1997. 1045 p.
9. Liberty NCX / Synopsys. - 2013. - 431 p.
10. PrimeTime-VX / Synopsys. - 2013 - 96 p.
11. HSPICE, Basic Simulation and Analysis / Synopsys. - 2013 - 925 p.

ԵՊՀ: Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 09.04.2014:

К.П. СЛОЯН

**СПОСОБ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ СТАТИСТИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ
ЦИФРОВЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ**

Предложен способ статистического временного анализа, учитывающий технологические отклонения временных параметров элементов цифровых интегральных схем и позволяющий значительно увеличить точность результатов временной проверки при допустимом росте затрат машинного времени, требуемых для их получения.

Ключевые слова: временные параметры, статистический временной анализ, временная задержка.

K.P. SLOYAN

**A METHOD FOR REPRODUCING THE STATISTICAL BEHAVIOR OF DIGITAL
INTEGRATED CIRCUITS**

A new method for statistical timing analysis taking into account the process variations of timing parameters of digital IC elements is proposed. It gives an opportunity to considerably increase the accuracy of the timing check results at admissible increase in the waste of the machine time which is required to obtain them.

Keywords: timing parameters, statistical timing analysis, timing delay.

SOHRAB SH. NAGHSHPOOR

**DESIGN AND MODELING OF AN INFORMATION TRANSFER
SYSTEM FOR MANAGING ELECTRONIZED EMERGENCY VEHICLES
(EEV)**

The designed program model consists of three separate parts which are the input part, the processing part and the output part for registering patients in electronized emergency vehicles and tracking the vehicles to the destination hospitals by low traffic roads with global position navigation systems, as well as for transferring the patient's information via mobile communication networks.

Keywords: EEV, GPRS, GPS, A-GPS, LAB VIEW, ICT, VRP, CUP, HMP.

Introduction. For many years, technology has helped people to improve and secure their lives, but the more the population grows the more the safety and health decrease from the standard quality levels. Traffic also expands day for day which has a direct side effect by generating a delay in emergency service operations, but there are many ways to use the same technologies parallelly to solve part of these problems.

The designed model will use several technologies to help most important operations to save a human's life and decrease the time loss because of traffic, and also control the whole emergency operation from inside the emergency vehicle to the destination hospital. These will help to increase the chances for more patients to survive.

By many technologies people try to overcome different diseases. Those technologies are hospital devices, home electronized devices, computers, cellular phones, data transferring capability, navigation devices, cars, transportation, etc. These help us to have a more comfortable life, but these technologies have some negative side effects on human life, too, like some dangers and time losses. Traffic is one of the biggest problems in this century. Many people lose their time and lives in heavy traffic in big cities around the world.

The main purpose of this paper is to substantiate the application of advanced technologies to help decrease the life loss because of traffic and much paper work in the whole emergency operation. The emergency vehicles help transport the patients to hospitals, and with the electronic medical devices inside, they try to keep the patients alive as long as possible, but if the vehicles spend a very long time in heavy traffic with their elementary devices, they cannot support and save the patient's life because in some emergency cases, patients have to be operated on immediately. The registration of the patient's condition at hospitals is also a loss of time but with this designed model of EEV (electronized emergency vehicle) they can pass through the

traffic and the patient's registration operation by the vehicle, and also the monitoring of the patient's condition in the chosen destination hospital.

Description of the EEV (electronized emergency vehicle) model. The model is designed by Labview to show how we can use the information technology, mobile communication services and the navigation system for emergency vehicles which we call electronized emergency vehicles or EEVs.

The VRP inside the EEV is the first input part of the main system to register the patients and their emergency conditions, VRP enables the emergency vehicle nurses, after picking up the patient, to register the conditions of the patient. This operation will start with the EEV identification number, the patient's name, the family name, age range, sex, condition, vital signs, body part conditions and infusions to monitor all this information at the chosen destination hospital for the emergency unit doctors to know about their patient's emergency conditions before he reaches that hospital.

The destination hospital choice is the main process in the whole system which is managed by the central unit of the designed model. It controls the EEV via an online map and tracks the position of each vehicle, and manages its destination hospital from the point where it has to pick up the patient, and compares the traffic in the streets and the patient's condition to find the nearest destination hospital which must have the right specialization of treatment for each patient.

The central controlling unit is called CUP or (central unit panel) which follows the online map of the city traffic and tracks the system on the map with GPS trackers for each EEV. This unit calculates and manages the distance between each EEV to the nearest hospital with the required specialization for the patient by the number of EEV which registers its patient from inside the EEV with VRP (vehicle registration panel) at first and sends the information to the central unit to be processed.

The central unit panel, after accepting the EEV's request, automatically brings the identification code of the EEV and the patient's condition, the operator of the system chooses the destination hospital for each accepted vehicle and pushes the button to send the name of the chosen destination hospital to the EEV panel, and at the same time, to send the information on that EEV patient to the chosen destination hospital with the same button on the central unit panel, but if the driver of EEV does not know the exact address of the destination hospital and the routes from their EEV position, the operator finds that out from the map and sends all the exact turns and directions to the EEV panel driver to learn his steps before he reaches the chosen destination hospital.

The destination hospital monitor shows each online vehicle and its patient's emergency condition on HMP (hospital monitoring panel), but for the hospitals, the panel is more expanded than that of the CUP's because it must show more than one emergency condition of the patient for the doctors in destination hospitals. They need to know which part of the body is injured and what is the patient's vital signs, what kind of injections and infusions he has received. Infusion is one of the most important

parts, because any patient inside the emergency vehicle in a good or bad condition, takes some injections to relieve or stay alive until they reach the destination hospital but in some cases the nurses may forget to inform about the injected infusions to the hospital which is very dangerous, but the designed model of EEV's system will decrease that risk for the patient and the nurse because of the developed structure of this model for each part.

The VRP vehicle registration panel. The VRP panel inside the electronized emergency vehicle is for registering the patient after the first pickup inside the EEV, the designed panel starts with EEV identification number or code when the EEV sends its request to the central unit to be accepted and connected to the system.

The second part of the vehicle registration panel is the patient's personal information which starts with the patient's name, family name, age range, sex, the patient's condition and his vital signs. The patient's condition uses the opening cascade menu to choose one of these conditions such as a bone fracture, a dislocated bone, a multiple injury, scald, poisoning, hypotension, wound, heart attack, stroke, apoplexy, childbirth, blood pressure, internal bloodshed, external bloodshed, and internal and external bloodshed.

The vital signs opening the cascade menu are as follows:

1. Vital Signs Normal
2. Vital Signs Shocked
3. Vital Signs Weak
4. No Vital Signs

The VRP is the first part of the operation of this model allowing to register the patient in less than one minute which saves time at hospital because this operation has been done inside the EEV. This way of registration also helps the nurses and doctors not to lose their time for registration and checkup of the patient to understand his emergency situation at entering the destination hospital emergency unit. The next step or the third part of VRP is the body structure injury condition statistics which is very important for the nurses inside the electronized emergency vehicle for their further actions.

The body part structures on VRP are divided into four subparts:

1. Head Parts
2. Vital Organs
3. Digestive Organs
4. Movement Organs

This part helps the nurses inside the EEVs, to jump to the next menu and use the function keys to raise or lower the menus for choosing the parts and opening the menus of each part, then select the condition of each body part and push the tab again to follow and jump to the next body part condition registration, and help save as much time as possible. In this four body part structure group we have four items for each of

them to select the body parts and the conditions of those special parts which are grouped as:

The Head is the first part of the panel for checking the condition of:

- Skull
- Nose
- Jaw
- Eyes

The second part of the Panel is the Vital Organs:

- Brain
- Heart
- Lungs
- Chest

The third part of the body condition panel is Digestive Organs:

- Stomach
- Intestines
- Kidneys
- Liver

The last part of the body condition is about the Movement Organs:

- Spine
- Neck
- Hands
- Feet

Information on the condition of all these parts helps the doctors and nurses to be careful to any movement of the patient or any treatment in the EEV or at the destination hospital.

Each of the menus has three kinds of conditions:

- Normal
- Injured
- Probaly Injured

The operator of the VRP, by selecting each of these items and body structures will send the information on that body part condition to the chosen destination hospital for the emergency unit doctors to know about the patient's body part conditions, and help the EEV team to carry out any movement and electric shock or injection or any kind of relief operation.

The last part of the VRP is about four kinds of injections which are optional to add infusions, or can be empty if the infusions are not necessary for that patient by the type of injections, and select the values of those injections by ml-cc with an opening cascade menu to select and tab the next type of infusion.

All the VRP input fields are generated by a string format by using a cluster to send all this string information as one single data line. With the help of GPRS (general

Wireless telecommunication allows people to be alive and work in many ways which were impossible before, with over two hundred million cellular subscribers worldwide, users have overwhelmingly embraced the concept of having a telephone that is always with them. And now businesses also have a data connection with the office wherever they go, so that they can have access to e-mail, the Internet, their files, faxes and other data wherever and whenever it is needed, giving them a competitive advantage and more flexible lifestyles. A number of wireless data services are available today, but none are as exciting as a forthcoming data service for GSM networks called General Packet Radio Service (GPRS) [1].

Emergency Vehicle Patient Registration			
Vehicle Identification EEV 11			
Patient Name SOHRAH	Patient surname NAGHSHPOOR	Age Range 30-40	Sex Male
Patient Condition Stroke		Vital Signs Vital Signs Checked	
Specific Body Parts Damage Condition			
Head Parts		Vital Organs	
Skull	Skull Normal ☐	Brain	Brain Normal ☐
Nose	Nose Damage ☐	Heart	Heart Normal ☐
Ear	Ears Normal ☐	Lungs	Lungs Normal ☐
Eyes	Eyes Normal ☐	Chest	Chest May Damage ☐
Digestive Organs		Movement Organs	
Stomach	Stomach Normal ☐	Spine	Spine Normal ☐
Intestine	Intestine Normal ☐	Neck	Neck May Damage ☐
Kidney	Kidney Normal ☐	Hands	Hands Damage ☐
Liver	Liver Normal ☐	Feet	Feet Damage ☐
Insfusion 1 EXAMPLE ONE	Measure 1 30 ml-cc ☐	Insfusion 2 EXAMPLE TWO	Measure 2 10 ml-cc ☐
Insfusion 3 EXAMPLE THREE	Measure 3 50 ml-cc ☐	Insfusion 4 EXAMPLE FOUR	Measure 4 20 ml-cc ☐

INFORMATION SOURCE: 1. Description of Incident and EEV is Completed
 Hospital Admission and Address

0014. Yerevan, Hachya Nersisyan St, No 7 Building

- Head northeast on Kayan St toward Gulbenkian Street 95 m
- Continue onto Komitas Ave 26 km
- Take the ramp to Azatutyan Ave 130 m
- Keep left at the fork to continue toward Azatutyan Ave 21 m
- Continue on the ramp and merge onto Azatutyan Ave 270 m
- Turn right onto Nersisyan St 450 m

Nersisyan St

GPRS offers a continuous connection to the Internet for mobile phone and computer users. Experience has shown that most data communication applications do

not require continuous data transfer, Users may need to be connected to a data communication network (such as a LAN, WAN, the Internet, or a corporate Intranet), but that does not mean they are sending and receiving data at all times [3]. Data transfer needs are not generally balanced. In the majority of cases, users will tend to send out small messages but receive large downloads. GPRS is expected to provide a significant boost to mobile data usage and usefulness [4]. It is expected to greatly alter and improve the end-user experience of mobile data computing, by making it possible and cost-effective to remain constantly connected, as well as to send and receive data at much higher speed to help the EEVs for sending and receiving information to the central unit and the destination hospitals, its main innovation is that it is packet - based, all information on the patient is sent as a data packet to the central unit to be processed with in a string format and low volumes so that it will increase the data transmission speed and keep the EEV online steady.

The EEV tracking system. The tracking system for EEV is one of the most important parts of the designed model to decrease the time loss over the EEV's way and help it to pass the traffic to save the patient's life as much as possible, the GPS or global position system is a satellite technology to help any GPS device on earth to find its global position by X and Y then the altitude by Z.

Signals are transmitted from each satellite in the direction of the Earth. This signal is encoded with the "Navigation Message," which can be read by the user's GPS receivers. The Navigation Message includes orbit parameters (often called the "broadcast ephemeris"), from which the receiver can compute satellite coordinates (X, Y, Z). These are Cartesian coordinates in a geocentric system, with the Z axis pointing towards the North Pole, X pointing towards the Prime Meridian (which crosses Greenwich), and Y at right angles to X and Z to form a right-handed orthogonal coordinate system [5].

The time during which the signal is transmitted from the satellite is encoded on the signal, using the time according to an atomic clock onboard the satellite. The time of the signal reception is recorded by the receiver using an atomic clock [6]. A receiver measures the difference of these times, Fig.2.

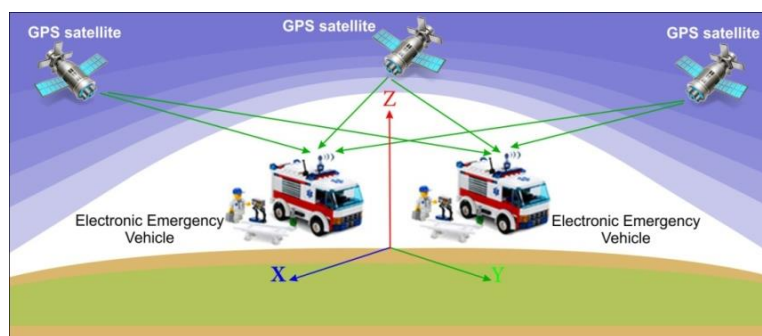


Fig.2. Global position system satellite connectivity with the EEV

The blind spots like tunnels or high buildings are usual problems for GPS devices as they cut the signal from satellites to the GPS receiver devices but the tracking of EEV's are very important to the central unit to manage all electronized emergency vehicles on the map and give the best roads to the nearest destination hospital with the needed specialization for their patient's treatment.

This problem is solved by A-GPS (assisted global position services) to help find the electronized emergency vehicles' position under the GPS blind spots, like under tunnels, and between high buildings or at strongly cloudy weather conditions, the A-GPS working via mobile communication antenna signals from cellular towers which are used to send and receive the information on the patient with the GPRS technology.

At the GPS blind spots, the A-GPS automatically starts to work and calculate the distance between the electronized emergency vehicles and the cellular towers of mobile signals to find the position of the EEV at the blind spots of the satellite, for example inside the tunnels, GPS signals will be lost and the GPS device disconnects from the tracking services, but the cellular signals support all the area inside the tunnels to keep the tunnels under the coverage of mobile services. With those technologies, the central unit can follow the vehicles everywhere with the help of GPS, or at blind spots of GPS, with the help of cellular towers and the A-GPS system.

The CUP Central Unit Panel. The central unit panel is a very important unit for this model working around the whole emergency system to manage the EEVs. The vehicles are under tracking on the map all the time when they are at work, the central unit monitors the position of EEVs and knows the address of each hospital and its specialization of treatment for the patient.

After the pickup of the patient, the EEV registers the conditions of the patient and his body part conditions by the designed model program but the important part of the central unit operation is to control the patient's emergency condition after the pickup and after receiving the request by the EEV to be input in the CUP of the designed model.

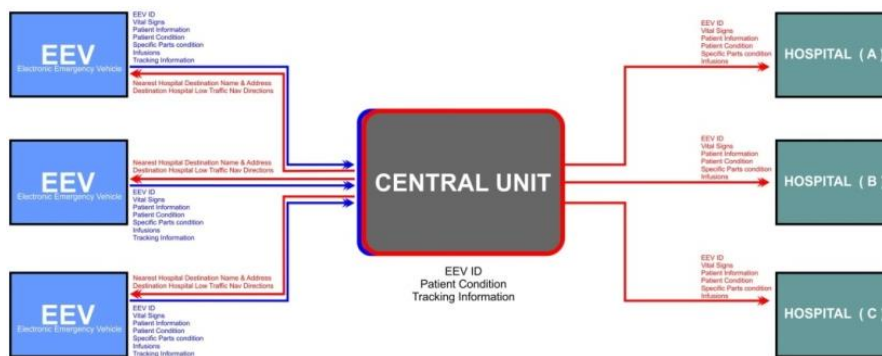


Fig.3. Algorithm of EEV's operations with central unit and hospitals

The central unit notification alarm lights and the operator of the system understands that one of the EEVs wants to be connected to the center by sending the request, the operator of the CUP pushes the acceptance button to let the vehicle enter the central unit panel.

The first thing that shows the CUP is the EEV identification, which is registered on the VRP inside the electronized emergency vehicle and the second part is just about the patient's emergency condition, the central unit finds the vehicle on the online map and follows the city street to find a low traffic route to manage that EEV's passage to the chosen destination hospital. The operator finds the nearest hospital with a specialized treatment for the patient along the ways with possibly low traffic after processing all these things and choosing the nearest hospital from the list, it sends the brief information on the hospital and roads with all turns and directions to the EEV driver to follow the path and pass along the streets and reach the hospital as soon as possible.

At the same time, by choosing the nearest hospital from the list and pushing the button to send the hospital name to the EEV, the central unit makes connections between the EEV and the destination hospital by sending the EEV's identification and all the registered information on the patient to the chosen destination hospital HMP.

This online connection between the EEV and the destination hospital helps the nurses inside the EEV to connect with the destination hospital emergency unit doctors to do everything right, and the doctors in the hospital emergency unit to know all information on the patient in the EEV and get ready to accept the patient and treat him in a specialized way.

When the EEV arrives at the destination hospital emergency unit, the doctors know about the conditions, vital signs and injections carried out inside the EVV and it helps to decrease the confusion of doses, etc.

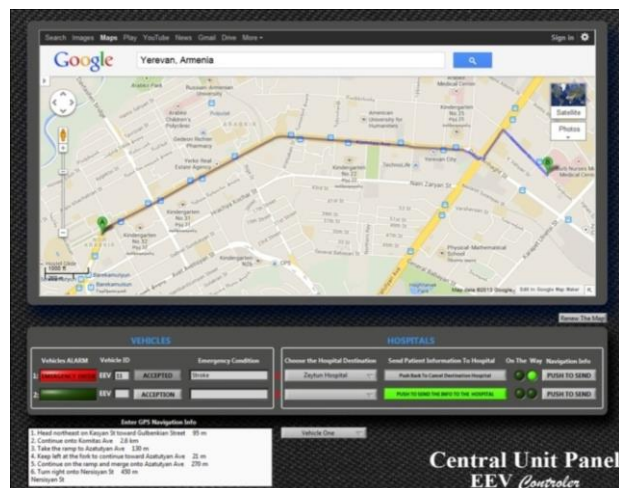


Fig.4. CUP or central unit panel

The HMP Hospital Monitoring Panel. The hospital monitoring panel shows all the information on the patient's name, family name, age range, sex, patient condition, and vital signs of the patient and all the body part injuries, or normal or probable injuries.

That information is registered from the EEV by the VRP of this model which is done by the nurses inside the EEV and sent to the central unit to take a permission from the central unit and show the chosen destination hospital on the monitor panels which are chosen by the central unit operators to transfer to the doctors at the destination hospital.

The screenshot displays the 'Hospital EEV Monitoring Panel' for 'Zeytun Hospital Panel'. It features two columns of data for two different vehicles (EEV ID 11 and 12). Each column contains fields for Name, Family, Age, Sex, Condition, Vital Signs, and a list of body parts (Skull, Nose, Jaw, Eyes, Brain, Heart, Lungs, Chest, Stomach, Intestine, Kidney, Liver, Spleen, Neck, Hands, Feet) with corresponding status indicators (Normal, Damage, or Shocked). At the bottom of each column is a 'Push to Save' button.

EEV ID	Name	Family	Age	Sex	Condition	Vital Signs	Skull	Nose	Jaw	Eyes	Brain	Heart	Lungs	Chest	Stomach	Intestine	Kidney	Liver	Spleen	Neck	Hands	Feet	Infusion
11	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
12	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

Fig.5. HMP (hospital monitoring panel) view

After the EEV arrives at the destination hospital, the monitored information can be saved by the operator or used by the barcode scanner technology for each EEV, when the EEV arrives at the destination hospital emergency unit entrance, the barcode reader scanner automatically reads the barcode of that vehicle and sends the received information from the CUP to the servers for the patient's online documents to the doctors, hospitals and patients, and allows to get the medical information about their treatment histories. The information will be accessible online all the time.

Conclusions. The designed model, by using developed technologies like the mobile communication technology, the information technology and the navigation system will help to develop the emergency vehicles, all the emergency operations generating communication between the emergency vehicles and the center and the hospitals with the help of mobile network communication. The patient's registration operations will be carried out inside the emergency vehicles completely, and when the patients arrives at the destination hospital, he will not lose his vital time for the registration operation and checkup, because that information has been received before

his arrival. The same is with the whole information, vital signs and the condition concerning the patient.

This model will help to track the emergency vehicles with the GPS service to control each EEV in every state and street of the city, this can also help the system operators in the central unit to find the best and shortest roads for each EEV on the map by keeping them far from the heavy traffic zones. This model can solve a huge percentage of emergency vehicle problems related to delays because of traffic and, increase the chance of saving the patient's life. It can also help the doctors and nurses in the destination hospital to get ready for a specialized treatment of the patient.

REFERENCES

1. **Peter Rysavy** "General Packet Radio Service", <http://gsmdata.com>, 2001
2. **Rachel Keller** "General Packet Radio Service GPRS", <http://misnt.indstate.edu>
3. **Comer Douglas E.** The book of everything you need to know about computer networking and how internet works. 4th ed. - Naghous Publications, Tehran, 2007.- 424 p.
4. **Proakis John G.** Digital communications. 5th ed.- Fadak Publications, Tehran, 2008.- 1176 p.
5. **Geoffrey Blewitt** Basics of the GPS Technique: Observation Equation. <http://nc1.ac.uk>, 2007
6. **Mukesh.P.R.** Real Time Web Based Vehicle Tracking Using GPS.- Jan., 2010.

SEUA (POLYTECHNIC). The material is received 10.03.2014.

Ա.Շ. ՆԱԴՇԴՈՒՐ

ՇՏԱԴՕԳՆՈՒԹՅԱՆ ԷԼԵԿՏՐՈՆԱՑՎԱԾ ՄԵՔԵՆԱՆԵՐԻՑ ՏՎՅԱԼՆԵՐԻ ՀԱՂՈՐԴՄԱՆ ԿԱՌԱՎԱՐՄԱՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳԻ ՆԱԽԱԳԾՈՒՄ ԵՎ ՄՈՂԵԼԱՎՈՐՈՒՄ

Մշակված է շտապօգնության էլեկտրոնացված մեքենաների LabView միջավայրում աշխատող մոդելը՝ բաղկացած երեք հիմնական մասերից՝ տվյալների ներմուծում, տվյալների մշակում և հիվանդի գրանցում: Նախատեսված է նաև դրանց ուղղորդումը ճանապարհային խցանումները շրջանցելու պայմանով, օգտագործելով անլար շարժական հեռահաղորդակցության և GPS տեխնոլոգիաները:

Առանցքային բառեր. շտապօգնության էլեկտրոնացված մեքենաներ, GPRS, GPS, A-GPS, LabView, ICT, VRP, CUP, HMP:

С.Ш. НАХШПУР

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПЕРЕДАЧЕЙ ДАННЫХ ИЗ ЭЛЕКТРОНИФИЦИРОВАННЫХ МАШИН СКОРОЙ ПОМОЩИ

Модель, разработанная в среде LabView, состоит из трех основных частей: ввод данных, обработка данных и регистрация пациента, перемещаемого в электронифицированной машине скорой помощи. Предусматривается также учет дорожного трафика посредством применения технологий беспроводной мобильной связи и GPS.

Ключевые слова: электронифицированные машины скорой помощи, GPRS, GPS, A-GPS, LabView, ICT, VRP, CUP, HMP.

УДК 621.3

АВТОМАТИЗАЦИЯ И
СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯА.А. ТЕРЗЯН, Г.С. СУКИАСЯН, А.Э. АКОПЯН, А.А. ГЕВОРГЯН,
Н.А. ЕГИАЗАРЯН**СОПОСТАВИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ВЕКТОРА
МАГНИТНОГО ПОТЕНЦИАЛА ПРИ ТРЕХМЕРНОМ
КОНЕЧНОЭЛЕМЕНТНОМ МОДЕЛИРОВАНИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ**

Исследована задача расчета вектора магнитного потенциала при трехмерном конечно-элементном моделировании нелинейного электромагнитного поля. Сравнены три следующих метода: последовательное нахождение трехмерного вектора магнитного потенциала на одном процессоре; параллельное решение трехмерной полевой задачи на трех процессорах с распараллеливанием процесса решения по трем независимым уравнениям относительно составляющих вектора магнитного потенциала и параллельное решение трехмерной полевой задачи методом конечных элементов на трех процессорах с распараллеливанием процесса решения путем разбиения исследуемой области на три подобласти. Показана эффективность распараллеливания процесса решения полевых задач методом конечных элементов по трем составляющим векторного магнитного потенциала.

Ключевые слова: электромагнитное поле, вектор магнитного потенциала, распараллеливание решения.

Постановка задачи. Трехмерное магнитное поле, созданное электрическим током, подчиняется классическому уравнению Максвелла:

$$\operatorname{rot} \frac{1}{\mu} (\operatorname{rot} \vec{A}) = \vec{\delta}, \quad (1)$$

где $\vec{A}$ - вектор магнитного потенциала; $\vec{\delta}$ - вектор плотности тока; μ - величина магнитной проницаемости.

Согласно теореме о разложении Гельмгольца, если дивергенция и ротор поля определены в каждой точке области, то во всей области вектор поля можно представить в виде суммы безвихревого и соленоидального полей [1,2]. Тем самым вектор магнитного потенциала можно представить в виде $\vec{A}' = \vec{A} + \operatorname{grad} \phi$, следовательно, для любой скалярной функции ϕ , $\vec{B}' = \vec{B}$, так как $\operatorname{rot}(\operatorname{grad} \phi) = 0$.

Таким образом, имеется множество решений уравнения Максвелла. При решении трехмерной задачи магнитостатики для того, чтобы уравнение Максвелла решалось однозначно, применяется кулоновская калибровка, которая требует принудительного выполнения условия [2-4]:

$$\operatorname{div} \vec{A} = 0.$$

Кулоновская калибровка позволяет привести (см. [4]) уравнения Максвелла (1) в декартовой системе координат к системе из трех независимых уравнений относительно каждой составляющей:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} \frac{1}{\mu} \frac{\partial}{\partial x} A^x + \frac{\partial}{\partial y} \frac{1}{\mu} \frac{\partial}{\partial y} A^x + \frac{\partial}{\partial z} \frac{1}{\mu} \frac{\partial}{\partial z} A^x = -\delta^x, \\ \frac{\partial}{\partial x} \frac{1}{\mu} \frac{\partial}{\partial x} A^y + \frac{\partial}{\partial y} \frac{1}{\mu} \frac{\partial}{\partial y} A^y + \frac{\partial}{\partial z} \frac{1}{\mu} \frac{\partial}{\partial z} A^y = -\delta^y, \\ \frac{\partial}{\partial x} \frac{1}{\mu} \frac{\partial}{\partial x} A^z + \frac{\partial}{\partial y} \frac{1}{\mu} \frac{\partial}{\partial y} A^z + \frac{\partial}{\partial z} \frac{1}{\mu} \frac{\partial}{\partial z} A^z = -\delta^z. \end{cases} \quad (2)$$

Заметим, что уравнение Максвелла (1) в декартовой системе координат состоит из трех уравнений, которые явно зависят от всех трех составляющих A^x, A^y, A^z , в то время как три уравнения системы (2) связаны неявно посредством функции магнитной проницаемости. Это дает возможность распараллеливания процесса решения системы (2) по трем независимым уравнениям относительно составляющих вектора магнитного потенциала.

Прямое решение системы (2) затруднительно из-за нелинейности задачи: величина магнитной проницаемости зависит от потенциала и тоже является неизвестной. В методе конечных элементов задача нахождения решения системы (2) заменяется вариационной, т.е. рассматривается некий функционал, минимум которого достигается точным решением уравнений (2). Затем с помощью метода базисных функций можно получить расчетные уравнения для минимизации функционала.

Решим одну и ту же трехмерную задачу магнитостатики тремя следующими методами и сравним затраченное время и поведение невязки. Пусть исследуемая область представляет собой параллелепипед, имеющий n_1, n_2, n_3 внутренних узлов дискретизации в длину, ширину и глубину, причем $n_1 \leq n_2 \leq n_3$.

Метод 1. Последовательное нахождение трехмерного вектора магнитного потенциала методом конечных элементов на одном процессоре.

В методе конечных элементов задача решения системы дифференциальных уравнений (2) сводится к решению системы линейных уравнений с матрицей ленточного типа.

Каждому узлу соответствуют три неизвестных значения составляющих вектора магнитного потенциала в данном узле. Таким образом, количество неизвестных (и количество уравнений) в расчетной системе линейных уравнений будет равно $3n_1 n_2 n_3$. Соответствующая матрица имеет размер $3n_1 n_2 n_3 \times 3n_1 n_2 n_3$. Для

уменьшения ширины ленты матрицы узлы сетки выгоднее нумеровать вдоль более коротких сторон. Тогда ширина ленты не будет зависеть от длины наибольшей стороны (т.е. от n_3) и имеет порядок $9n_1n_2 + 3n_1$.

Метод 2. Параллельное решение трехмерной полевой задачи методом конечных элементов на трех процессорах с распараллеливанием процесса решения системы (2) по трем независимым уравнениям относительно составляющих вектора магнитного потенциала.

Из-за независимости уравнений в системе (2) появляется возможность их параллельного решения на трех процессорах, что приводит к уменьшению втрое количества неизвестных в каждом процессоре. Оценим, как уменьшаются размеры соответствующих матриц и их лент ненулевых элементов при параллельном решении на трех процессорах.

Количество неизвестных (и количество уравнений) на каждом процессоре равно $n_1n_2n_3$. Соответствующая матрица имеет размер $n_1n_2n_3 \times n_1n_2n_3$, а ширина ее ленты имеет порядок $n_1n_2 + n_1$.

Так как магнитная проницаемость μ зависит от вектора индукции магнитного поля, а последний зависит от всех трех составляющих вектора магнитного потенциала, то при параллельном решении приходится обеспечивать межпроцессорный обмен значениями магнитной проницаемости μ . Время, затрачиваемое на межпроцессорный обмен, пропорционально количеству n_{Fe} элементов (тетраэдров), находящихся в ферромагнитных участках сетки.

Метод 3. Параллельное решение трехмерной полевой задачи методом конечных элементов на трех процессорах с распараллеливанием процесса решения путем разбиения исследуемой области на три подобласти.

Каждая подобласть представляет собой параллелепипед, имеющий $n_1, n_2, \frac{n_3}{3}$ внутренних узлов дискретизации в длину, ширину и глубину. Количество неизвестных (и количество уравнений) на каждом процессоре равно $n_1n_2n_3$. Соответствующая матрица имеет размер $n_1n_2n_3 \times n_1n_2n_3$, а ширина ее ленты зависит от соотношений между n_1, n_2, n_3 . Если $n_1 < n_2 < \frac{n_3}{3}$, то, как и в последовательном случае, ширина ленты не будет зависеть от длины наибольшей стороны (т.е. от n_3) и имеет порядок $9n_1n_2 + 3n_1$. Если $n_1 < \frac{n_3}{3} < n_2$, то после разбиения исследуемой области на три подобласти длиной наибольшей стороны

будет n_2 . Ширина ленты получается заменой n_2 на $n_3/3$ и имеет порядок $3n_1n_3+3n_1$.

Если же $\frac{n_3}{3} < n_1 < n_2$, то после разбиения исследуемой области на три подобласти длиной наименьшей стороны будет $n_3/3$. Ширина ленты получается заменой n_1 на $n_3/3$ и имеет порядок $3n_1n_3+n_3$.

Время, затрачиваемое на межпроцессорный обмен, пропорционально количеству узлов n_{gr} на границе подобластей. Для регулярной сетки оно равно $2n_1n_2$ для средней подобласти и n_1n_2 для крайних подобластей.

Уменьшение размеров матриц не только ускоряет время счета, но и существенно улучшает точность приближенного решения, что приводит к уменьшению числа необходимых итераций. Уменьшение размеров матриц также благотворно влияет на невязку, возникающую при пересчете значений магнитной проницаемости μ .

Сопоставим два метода распараллеливания. При прочих равных условиях, общее затраченное время и поведение невязки зависят лишь от времени, затрачиваемого на межпроцессорный обмен. При распараллеливании процесса решения по трем независимым уравнениям относительно составляющих вектора магнитного потенциала время межпроцессорного обмена пропорционально количеству n_{Fe} элементов, находящихся в ферромагнитных участках сетки.

При распараллеливании процесса решения путем разбиения исследуемой области на три подобласти время межпроцессорного обмена пропорционально количеству узлов n_{gr} на границе подобластей. Итак, эффективность распараллеливания зависит от соотношения параметров сетки n_{Fe} и n_{gr} .

Уменьшение размеров матриц не только ускоряет время счета, но и существенно улучшает точность приближенного решения, что приводит к уменьшению числа необходимых итераций. Уменьшение размеров матриц также благотворно влияет на невязку, возникающую при пересчете значений магнитной проницаемости μ . Все это, а также зависимость распараллеливания от параметров компьютера делают затруднительным теоретическое сопоставление последовательного и параллельных методов. Поэтому такое сопоставление проведено ниже на практической задаче.

Численные результаты. Предложенное сопоставление реализовано на модельной линейной электрической машине, представленной на рис. 1.

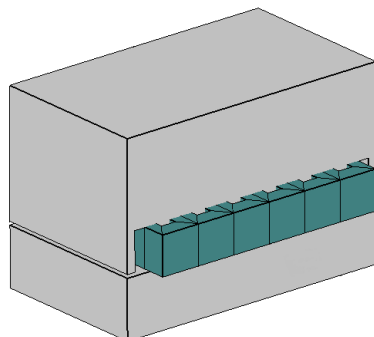


Рис. 1. Модельная линейная электрическая машина

На рис. 2 представлена расчетная тетраэдрическая сетка, состоящая из 212 узлов и 1096 тетраэдров. Краевым условием является приравнивание нулю всех составляющих вектора магнитного потенциала по краям сетки.

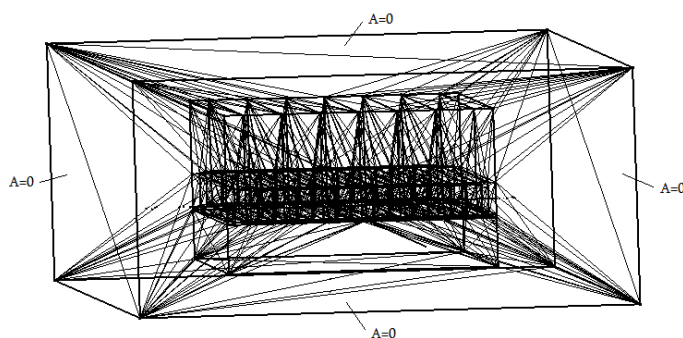


Рис. 2. Расчетная сетка

На рис. 3 представлен график поведения невязки при расчете поля тремя рассмотренными методами.

Из графика видно, что с точки зрения затраченного времени и скорости уменьшения невязки, наихудшим является последовательное решение полевой задачи на одном процессоре, а наилучшим - решение задачи на трех процессорах с распараллеливанием процесса решения по трем независимым уравнениям относительно составляющих вектора магнитного потенциала.

Заметим, что все численные эксперименты проведены на вычислительном кластере Государственного инженерного университета Армении.

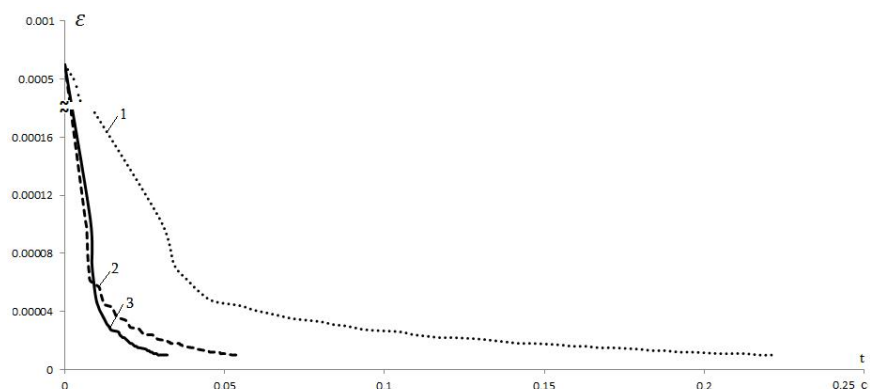


Рис. 3. Результаты численных экспериментов при:

1- последовательном нахождении трехмерного вектора магнитного потенциала на одном процессоре, 2- параллельном решении задачи на трех процессорах разбиением исследуемой области на три подобласти, 3- решению задачи на трех процессорах с распараллеливанием процесса решения по трем независимым уравнениям относительно составляющих вектора магнитного потенциала

Закключение. По сравнению с последовательным счетом распараллеливание процесса решения полевых задач методом конечных элементов является более эффективным. Эффективность распараллеливания зависит от соотношения параметров сетки n_{Fe} и n_{gr} . На модельной линейной электрической машине более эффективно распараллеливание процесса решения по трем составляющим векторного магнитного потенциала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нейман Л.Р., Калантаров П.Л. Теоретические основы электротехники. Т.3. – М.: Госэнергоиздат, 1959. - 231 с.
2. Макаров А.М., Лунева Л.А. Основы электромагнетизма. Т.3: Электронный учебник. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002.
3. Терзян А.А., Сукиасян Г.С., Акопян А.Э. О свойствах векторных характеристик при конечноэлементном моделировании трехмерного магнитного поля // Известия НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. – 2012.-Т. 65, № 4.- С. 406-414.
4. Терзян А.А., Сукиасян Г.С., Акопян А.Э. Геворгян А.А. О свойствах дивергенции вектора магнитного потенциала при трехмерном конечноэлементном моделировании нелинейного магнитного поля// Известия НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. – 2013.- Т. 66, № 3.- С. 177-181.

ГИУА (ПОЛИТЕХНИК). Материал поступил в редакцию 10.03.2014.

Հ.Ա. ԹԵՐԶՅԱՆ, Հ.Ս. ՍՈՒՔԻԱՍՅԱՆ, Ա.Է. ՀԱԿՈԲՅԱՆ, Ա.Ա. ԳԵՎՈՐԳՅԱՆ
Ն.Ա. ԵԴԻԱԶԱՐՅԱՆ

ՄԱԳՆԻՍԱԿԱՆ ԴԱՇՏԻ ԵՌԱԶԱՓ ՎԵՐՋԱՎՈՐ ՏԱՐԲԱՅԻՆ ՍՈՂԵԼԱՎՈՐՄԱՄԲ
ՄԱԳՆԻՍԱԿԱՆ ՊՈՏԵՆՑԻԱԼԻ ՄԵԹՈԴՆԵՐԻ ՎԵԿՏՈՐԻ ՀԱՇՎԱՐԱԿԻ ՀԱՄԵՄԱՏԱԿԱՆ
ՎԵՐԼՈՒԾՈՒԹՅՈՒՆ

Հետազոտվել է եռաչափ էլեկտրամագնիսական դաշտի վեկտորական մագնիսական պոտենցիալի՝ վերջավոր տարրերի մեթոդով հաշվարկի խնդիրը: Համեմատված են հետևյալ երեք մոտեցումները՝ մագնիսական պոտենցիալի եռաչափ վեկտորի հաջորդաբար որոշումը մեկ պրոցեսորի վրա, եռաչափ դաշտային խնդրի զուգահեռ լուծումը երեք պրոցեսորների վրա (զուգահեռացումը՝ ըստ երեք անկախ հավասարումների ամեն մի բաղադրիչի) և եռաչափ դաշտային խնդրի՝ վերջավոր տարրերի մեթոդով զուգահեռ լուծումը երեք պրոցեսորների վրա (զուգահեռացումը՝ հետազոտվող տիրույթի երեք ենթատիրույթների տրոհման միջոցով): Ցույց է տված եռաչափ դաշտային խնդրի՝ վերջավոր տարրերի մեթոդով երեք անկախ հավասարումների զուգահեռացման արդյունավետությունը՝ ըստ ամեն մի բաղադրիչի:

Առանցքային բառեր. էլեկտրամագնիսական դաշտ, վեկտորական մագնիսական պոտենցիալ, լուծման զուգահեռացում:

H.A. TERZIAN, H.S. SUKIASYAN, A.E. HAKOBYAN, A.A. GEVORGYAN,
N.A. YEGHIAZARYAN

A COMPARATIVE ANALYSIS OF THE CALCULATION METHODS FOR THE
MAGNETIC POTENTIAL VECTOR AT THREE DIMENSIONAL FINITE ELEMENT
SIMULATION OF THE MAGNETIC FIELD

The problem of calculation of the magnetic potential vector at three dimensional finite element simulation of nonlinear magnetic field is investigated. The following three methods are compared: a successive determination of three dimensional vector of the magnetic potential on one processor; parallel solution of three dimensional field problem on three processors with parallelization of the solution process by three independent equations with respect to the components of magnetic potential vector; and the parallel solution of three dimensional field problem by the finite element method on three processors with parallelization of the solution process by dividing the considered domain into three subdomains.

The effectivity of parallelization of the solution process for field problems by the finite element method by three components of the magnetic potential vector is shown.

Keywords: electromagnetic field, magnetic potential vector, parallelization of the solution.

С.О. СИМОНЯН, Г.А. АСЛАНЯН

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ (В, Q)- ОБОБЩЕННО-
ОБРАТНЫХ МАТРИЦ

Предложен достаточно простой численно-аналитический метод определения параметрических (В, Q)- обобщенно-обратных матриц [1], основанный на дифференциальных преобразованиях Г.Е. Пухова. Рассмотрен модельный пример.

Ключевые слова: параметрические обобщенно-обратные матрицы, дифференциальные преобразования, информационные технологии.

Введение. Рассмотрим систему линейных параметрических уравнений вида

$$A(t)\bar{x}(t) = \bar{y}(t), \quad (1)$$

где $\bar{A}(t)$ - параметрическая матрица с размерами $m \times n$ и рангом r ; $\bar{x}(t)$ - n -мерный вектор; $\bar{y}(t)$ - заданный m -мерный вектор.

Матрицу $\bar{A}(t)$, при которой решение системы (1) можно представить в виде

$$\bar{x}(t) = \bar{A}(t)\bar{y}(t), \quad (2)$$

назовем обобщенно-обратной (О-обратной) к матрице $A(t)$. Для этой матрицы необходимо и достаточно выполнение условия [1]

$$A(t)\bar{A}(t)A(t) = A(t). \quad (3)$$

В работе [1] предложен метод классификации О-обратных матриц на основе соотношений между рангом r и размерами $m \times n$ матрицы $A(t)$. Рассмотрены следующие возможные случаи:

1. $r = m < n$.
 2. $r = n < m$.
 3. $r < m < n$.
 4. $r < n < m$.
 5. $r = m = n$.
- (4)

По существу, случаи 3 и 4, очевидно, совпадают; случаи 1 и 2 рассмотрены в работе [2], а в последнем случае матрица $A(t)$ имеет единственную обратную

матрицу, и все множество О-обратных к ней матриц состоит из элемента $A^{-1}(t)$. В дальнейшем мы будем рассматривать только случай 3.

Пусть $r < m < n$. В этом случае матрица $A(t)$ является существенно недоопределенной [1]. Представим матрицу $A(t)$ в виде ее скелетного разложения [1]

$$A(t) = S(t)R(t), \quad (5)$$

где $S(t)$ и $R(t)$ - матрицы размерностей $m \times r$ и $r \times n$ соответственно. Тогда систему (1) можно представить в следующем виде:

$$S(t)R(t)\bar{x}(t) = \bar{y}(t). \quad (6)$$

Далее, обозначив

$$R(t)\bar{x}(t) = \bar{z}(t), \quad (7)$$

получим

$$S(t)\bar{z}(t) = \bar{y}(t). \quad (8)$$

Имея в виду случаи 1 и 2 [2], решения систем (7) и (8) будут представлены в следующем виде:

$$\bar{x}(t) = \bar{R}(t)\bar{z}(t), \quad \bar{R}(t) = B(t)[R(t)B(t)]^{-1}, \quad (9)$$

$$\bar{z}(t) = \bar{S}(t)\bar{y}(t), \quad \bar{S}(t) = [Q(t)S(t)]^{-1}Q(t), \quad (10)$$

где $\bar{R}(t)$ - обобщенно (B)-обратная матрица к матрице $R(t)$; матрица $\bar{S}(t)$ - обобщенно (Q)-обратная к матрице $S(t)$, а матрицы $B(t)$ и $Q(t)$ являются матрицами размерности $n \times r$ и $r \times m$ соответственно [1].

Следовательно, для решения $\bar{x}(t)$ имеем

$$\bar{x}(t) = \bar{R}(t)\bar{S}(t)\bar{y}(t) = B(t)[R(t)B(t)]^{-1}[Q(t)S(t)]^{-1}Q(t)\bar{y}(t). \quad (11)$$

В этом случае матрица $\bar{A}(t)$, определяемая соотношением

$$\bar{A}(t) = \bar{R}(t)\bar{S}(t) = B(t)[R(t)B(t)]^{-1}[Q(t)S(t)]^{-1}Q(t), \quad (12)$$

удовлетворяет равенству (3) и, следовательно, является О-обратной к матрице $A(t)$ [1].

Естественно, матрицы $B(t)$ и $Q(t)$ нужно выбрать так, чтобы матрицы $R(t)B(t)$ и $Q(t)S(t)$ были невырожденными. В этом случае матрица $\bar{A}(t)$ называется (B, Q)-обратной к матрице $A(t)$ [1].

В таблице представлены важнейшие свойства (B, Q)- обратных матриц, а также обобщенно-обратных матриц Мура-Пенроуза $A^+(t)$ [3] (знаком “+” обозначено, что условия выполняются).

Таблица

No	Свойства О-обратных матриц	Классы О-обратных матриц	
		(B,Q)-обратные	$A^+(t)$
1	$A(t)\bar{A}(t)A(t) = A(t)$	+	+
2	$[\bar{A}(t)A(t)]^2 = \bar{A}(t)A(t)$	+	+
3	$[A(t)\bar{A}(t)]^2 = A(t)\bar{A}(t)$	+	+
4	$\bar{A}(t)A(t)\bar{A}(t) = \bar{A}(t)$	+	+

Математический аппарат предлагаемого метода. Допустим, что $A(t)$ – матрица с аналитическими элементами.

Сначала представим алгоритм скелетного разложения матрицы. Выберем r линейно независимых столбцов матрицы $A(t)$ и составим матрицу $S(t)$ ранга r и размерами $m \times r$:

$$S(t) = \begin{bmatrix} s_{11}(t) & \cdots & s_{1r}(t) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ s_{m1}(t) & \cdots & s_{mr}(t) \end{bmatrix}.$$

Произвольный столбец матрицы $A(t)$ можно представить в виде линейной комбинации столбцов матрицы $S(t)$

$$\downarrow a_j(t) = S(t) \downarrow r_j(t), \quad j = \overline{1, n}, \quad (13)$$

где $\downarrow a_j(t)$ и $\downarrow r_j(t)$ - j -е столбцы матриц $A(t)$ и $R(t)$ соответственно.

Следовательно, для нахождения матрицы $R(t)$ нужно решить систему уравнений (13), решение которого, как известно [1], выражается следующим соотношением:

$$\downarrow r_j(t) = \bar{S}(t) \downarrow a_j(t), \quad j = \overline{1, n}, \quad (14)$$

где $\bar{S}(t)$ - обобщенно-обратная матрица к матрице $S(t)$. Поскольку матрица $S(t)$ имеет размерность $m \times r$ и состоит из r линейно независимых столбцов, то

матрица $\bar{S}(t)$ является (Q)-обратной матрицей и представляется следующим выражением:

$$S(t) = [Q(t)S(t)]^{-1}Q(t), \quad (15)$$

где $Q(t)$ - $r \times m$ матрица такая, что $[Q(t)S(t)]$ является невырожденной [1].

Шаг 1. Вычисляется (Q)-обратная матрица к матрице $S(t)$, т.е. $\bar{S}(t)$, с помощью алгоритма, представленного в работе [2].

Шаг 2. Вычисляется матрица $R(t)$ с помощью следующего соотношения:

$$\downarrow r_j(t) = \bar{S}(t) \downarrow a_j(t), \quad j = \overline{1, n}, \quad (16)$$

где $\downarrow a_j(t)$ и $\downarrow r_j(t)$ - j -е столбцы соответственно матриц $A(t)$ и $R(t)$.

Шаг 3. Вычисляется (B)-обратная к матрице $R(t)$, т.е. $\bar{R}(t)$, также с помощью алгоритма, представленного в работе [2].

Шаг 4. Вычисляется (B, Q)-обратная матрица

$$\bar{A}(t) = \bar{R}(t)\bar{S}(t). \quad (17)$$

Д-аналог алгоритма вычисления (B, Q)-обратной матрицы

Представим операции вышеприведенного алгоритма в области дифференциальных преобразований [4].

Шаг 1. Вычисляются следующие матричные дискреты:

$$A(K) = \frac{H^K}{K!} \cdot \frac{\partial^K A(t)}{\partial t^K} \Big|_{t=t_v}, \quad K = \overline{0, \infty} \quad \bullet \quad A(t) = \aleph_1(t, t_v, H, A(K)), \quad (18)$$

$$S(K) = \frac{H^K}{K!} \cdot \frac{\partial^K S(t)}{\partial t^K} \Big|_{t=t_v}, \quad K = \overline{0, \infty} \quad \bullet \quad S(t) = \aleph_2(t, t_v, H, S(K)), \quad (19)$$

где K – целочисленный аргумент; H – масштабный коэффициент; t_v – центр аппроксимации; $\aleph_1(t, t_v, H, A(K)), \aleph_2(t, t_v, H, S(K))$ – некоторые матричные аппроксимирующие функции; * - знак Т-умножения (свертка), а знак $\bullet$ - знак перехода из области оригиналов в область Д-изображений и наоборот [4].

Шаг 2. Вычисляются матричные дискреты $\bar{S}(K), K = \overline{0, \infty}$ с помощью алгоритма, представленного в работе [2].

Шаг 3. Вычисляются матричные дискреты $R(K)$

$$\downarrow r_j(K) = \bar{S}(K) * \downarrow a_j(K) = \sum_{l=0}^K \bar{S}(l) \downarrow a_j(K-l), K = \overline{0, \infty}, j = \overline{1, n}, \quad (20)$$

где $\downarrow r_j(K)$ и $\downarrow a_j(K)$ - j -е столбцы матричных дискрет $R(K)$ и $A(K)$.

Шаг 4. Вычисляются матричные дискреты $\bar{R}(K)$, $K = \overline{0, \infty}$ также с помощью алгоритма, представленного в работе [2].

Шаг 5. Д-изображениями (B, Q)-обратной матрицы (17) будут

$$\bar{A}(K) = \bar{R}(K) * \bar{S}(K) = \sum_{l=0}^K \bar{R}(l) \bar{S}(K-l). \quad (21)$$

Таким образом, имея матричные дискреты (19), в соответствии с некоторым обратным дифференциальным преобразованием $\aleph(\bullet)$ можно восстановить оригинал (B, Q)-обратной матрицы $\bar{A}(t)$.

Модельный пример. Рассмотрим матрицу

$$A(t) = \begin{bmatrix} t+2 & 1 & t+3 & t+1 \\ 2 & 0 & 2 & 2 \\ 1 & t & t+1 & 1-t \end{bmatrix}.$$

Имеем $m = 3, n = 4$, а ранг матрицы $r = 2 < m < n$. Вычислим (B, Q)-обратную матрицу. Воспользуемся одноточечными дифференциально-тейлоровскими преобразованиями [5]:

$$X(K) = \frac{H^K}{K!} \cdot \frac{d^K x(t)}{dt^K} \Big|_{t=t_v=0}, K = \overline{0, \infty} \quad \underline{\bullet} \quad x(t) = \sum_{K=0}^{\infty} \left(\frac{t-t_v}{H} \right)^K \cdot X(K).$$

$$\text{Выберем } H = 1, t_v = 0 \text{ и } S(t) = \begin{bmatrix} t+2 & 1 \\ 2 & 0 \\ 1 & t \end{bmatrix}.$$

Используя формулы (18), (19) для вычисления матричных дискрет, получим

$$A(0) = \begin{bmatrix} 2 & 1 & 3 & 1 \\ 2 & 0 & 2 & 2 \\ 1 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}, A(1) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & -1 \end{bmatrix}, A(K) = [0], K = \overline{2, \infty};$$

$$S(0) = \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 2 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, S(1) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, S(K) = [0], K = \overline{2, \infty}.$$

Далее, пользуясь алгоритмом, представленным в работе [2], получим следующие матричные дискреты $\bar{S}(t)$:

$$\bar{S}(0) = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{2} & 0 \\ 1 & -1 & 0 \end{bmatrix}, \bar{S}(1) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{2} & 0 \end{bmatrix}, \bar{S}(K) = [0], K = \overline{2, \infty}.$$

С помощью формулы (20) получим

$$\begin{aligned} \downarrow r_1(0) &= \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \downarrow r_1(K) = [0], K = \overline{1, \infty}, \downarrow r_2(0) = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \downarrow r_2(K) = [0], K = \overline{1, \infty}, \\ \downarrow r_3(0) &= \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}, \downarrow r_3(K) = [0], K = \overline{1, \infty}, \downarrow r_4(0) = \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix}, \downarrow r_4(K) = [0], K = \overline{1, \infty}. \end{aligned}$$

Имея матричные дискреты $R(t)$, вычислим матричные дискреты $\bar{R}(t)$ с помощью алгоритма, представленного в работе [2]. Имеем

$$\begin{aligned} R(0) &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & -1 \end{bmatrix}, R(K) = [0], K = \overline{1, \infty}; \\ \bar{R}(0) &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \bar{R}(K) = [0], K = \overline{1, \infty}. \end{aligned}$$

И, наконец, используя соотношение (21), получим матричные дискреты (В, Q)-обратной матрицы:

$$\bar{A}(0) = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{2} & 0 \\ 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \bar{A}(1) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \bar{A}(K) = [0], K = \overline{2, \infty}.$$

В соответствии с обратными дифференциально-тейлоровскими (маклореновскими) преобразованиями [5] восстановим оригинал (В, Q)-обратной матрицы:

$$\bar{A}(t) = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{2} & 0 \\ 1 & -\frac{t+2}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Можно легко убедиться, что полученный оригинал точно удовлетворяет условию (3).

Заключение. Предложен достаточно простой численно-аналитический метод определения (B, Q)- параметрических обобщенно-обратных матриц, обладающий высокой вычислительной эффективностью. Метод легко реализуем средствами современных информационных технологий [6].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Светлаков А.А.** Обобщенные обратные матрицы: некоторые вопросы теории и применения в задачах автоматизации управления процессами. – Томск: Изд-во НТЛ, 2003. – 388 с.
2. **Симонян С.О., Асланян Г.А.** Метод определения параметрических (B)- и (Q)- обобщенно-обратных матриц // Вестник ГИУА. Серия “Информационные технологии, электроника, радиотехника”. – 2013. – Вып. 16, том 2. – С. 33-41.
3. **Ben-Israel A., Greville T. N.E.** Generalized Inverses: Theory and Applications. – NYC: Springer, 2003. – 435 p.
4. **Пухов Г.Е.** Дифференциальные преобразования функций и уравнений. – Киев: Наукова думка, 1984. – 420 с.
5. **Симонян С.О., Аветисян А.Г.** Прикладная теория дифференциальных преобразований. – Ереван: Издательство ГИУА “Чартарапет”, 2010. – 361 с.
6. **Stroustrup B.** The C++ Programming Language, 4th Edition. – Boston: Addison-Wesley Professional, 2013. – 1368 p.

ГИУА (ПОЛИТЕХНИК). Материал поступил в редакцию 02.12.2013.

Ս.Շ. ՍԻՄՈՆՅԱՆ, Հ.Ա. ԱՍԼԱՆՅԱՆ

ՊԱՐԱՄԵՏՐԱԿԱՆ (B, Q) ՏԵՍԱԿԻ ԸՆԴՀԱՆՐԱՅՎԱԾ ՀԱԿԱԴԱՐՁ ՄԱՏՐԻՑՆԵՐԻ ՈՐՈՇՄԱՆ ՄԵԹՈԴ

Առաջարկված է (B, Q) տեսակի պարամետրական ընդհանրացված հակադարձ մատրիցների որոշման բավականաչափ պարզ թվաանալիտիկ մեթոդ՝ հիմնված Գ.Ե. Պուխովի դիֆերենցիալ ձևափոխությունների վրա: Դիտարկված է մոդելային օրինակ:

Առանցքային բաներ. պարամետրական ընդհանրացված հակադարձ մատրիցներ, դիֆերենցիալ ձևափոխություններ, տեղեկատվական տեխնոլոգիաներ:

S.H. SIMONYAN, H.A. ASLANYAN

A METHOD FOR DETERMINING (B, Q)- TYPES OF PARAMETRIC GENERALIZED INVERSE MATRICES

A sufficiently simple numerical-analytical method for determining (B, Q)- types of parametric generalized inverse matrices is proposed based on G.E. Pukhov's differential transforms. A sample example is considered.

Keywords: parametric generalized inverse matrices, differential transforms, information technologies.

О.Н. ГАСПАРЯН, С.Г. АРАБЯН

**ИССЛЕДОВАНИЕ L_1 АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ
ИСКУССТВЕННОЙ РУКОЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА
ОБРАТНОЙ ДИНАМИКИ**

Проведено исследование системы управления искусственной рукой с N степенями свободы с учетом динамики исполнительных двигателей. С целью компенсации влияния неизвестного внешнего возмущения построена L_1 адаптивная система управления отдельными звеньями искусственной руки.

Ключевые слова: искусственная верхняя конечность, робот-манипулятор, адаптивная система управления L_1 , метод обратной динамики.

В статье предлагается новый подход к построению системы управления искусственной рукой (ИР) (рис. 1), основанный на применении методов теории L_1 адаптивного управления, который дает возможность обеспечить быструю адаптацию системы с сохранением её робастности [1,2].



Рис. 1. Внешний вид верхней искусственной конечности человека

Известно, что искусственная рука человека конструктивно относится к роботам-манипуляторам и динамика последних описывается сложной системой нелинейных взаимосвязанных уравнений, причем число степеней свободы ИР может достигать 27 [3].

Уравнение динамики N -мерного манипулятора в матричном виде [3] с учетом динамики исполнительных двигателей (ИД) постоянного тока имеет вид [4,5]

$$M^*(q)\ddot{q} + C^*(q, \dot{q})\dot{q} + g^*(q) = \tau + \sigma, \quad (1)$$

где q - N-мерный вектор обобщенных координат,

$$M^*(q) = [diag\{I_{Mi}\} + diag\{1/k_i^2\}M(q)],$$

$M(q)$ есть симметричная, положительно определенная матрица, зависящая от общей конфигурации и называемая матрицей (или тензором) инерции; I_{Mi} - моменты инерции роторов ИД, а k_i - коэффициенты передачи редукторов;

$$C^*(q, \dot{q}) = [diag\{C_{Mi}C_{ei}/r_i\} + diag\{M_{Frv_i}\} + diag\{1/k_i^2\}C(q, \dot{q})],$$

C_{Mi} - коэффициенты по моменту ИС; C_{ei} - коэффициенты противо-ЭДС, а r_i - активные сопротивления цепи ротора; $C(q, \dot{q})$ - матрица кориолисовых и центробежных сил; M_{Frv_i} - моменты вязкого трения в механических передачах,

$$g^*(q) = diag\{1/k_i^2\}g(q),$$

$g(q)$ – вектор гравитационных сил [1]; τ - вектор управляющих моментов, приложенных к звеньям, а $\sigma \in [\sigma_a, \sigma_b]$ - постоянное векторное возмущение.

Для разработки системы управления ИР применим известный в робототехнике метод обратной динамики [3], который линеаризует уравнения движения и сводит многомерную систему уравнений ИР к совокупности N отдельных интегрирующих звеньев второго порядка. Как показано в [6], вводя соответствующие коэффициенты обратных связей для обобщенных координат и их производных, можно также получить необходимое распределение корней характеристического уравнения линеаризованной ИР.

Если выбрать закон управления в соответствии со следующим уравнением:

$$\tau = r + u, \quad (2)$$

где r - постоянный сигнал уставки, а

$$u = C^*(q, \dot{q})\dot{q} - diag(K_{li})\dot{q} + M^*(q)\ddot{q} - \ddot{q}I + g^*(q) - diag(K_{oi})q, \quad (3)$$

K_{oi} и K_{li} – постоянные коэффициенты регулятора обратной динамики, которые выбираются исходя из желаемого распределения корней линеаризованных уравнений ИР, то можно записать следующее выражение для m -го ($m=1, 2, \dots, N$) звена ИР:

$$\ddot{q}_m + K_{1m}\dot{q}_m + K_{0m}q_m = r_m + \sigma_m. \quad (4)$$

Подчеркнем, что обобщенные координаты q_m , а также переменные r_m и $\sigma_m = \text{const}$ в (4) являются скалярными и описывают движение m -го изолированного звена ИР. Структурные схемы системы управления ИР с предложенной модификацией метода обратной динамики приведены на рис. 2 и 3 соответственно.

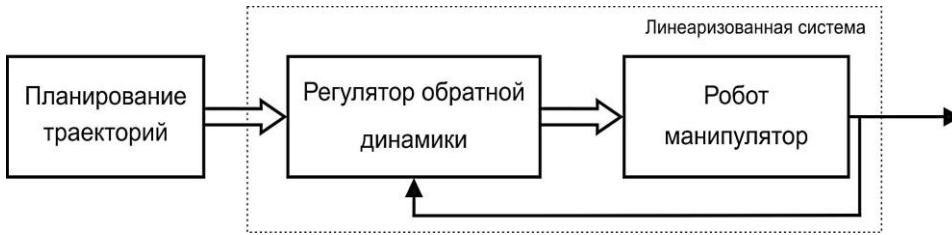


Рис. 2. Структурная схема системы с регулятором обратной динамики

Линейное уравнение (4) описывает динамику звеньев ИР, развязанных путем применения метода обратной динамики (т.е. изолированных).

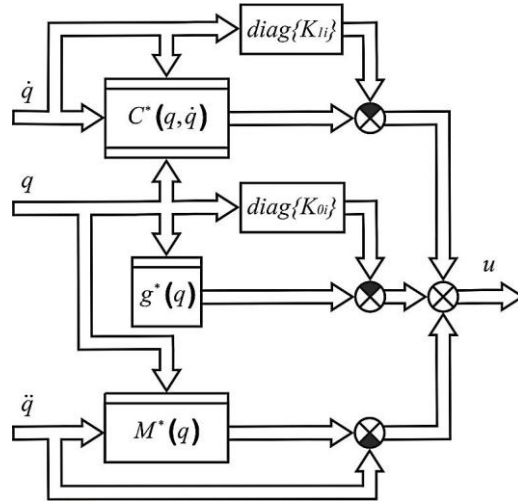


Рис. 3. Схема реализации метода обратной динамики

Уравнения движения каждого отдельного звена представляются в пространстве состояний в следующем виде:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + b(u(t) + \sigma(t)), \quad x(0) = 0, \\ y(t) &= c^T x(t), \end{aligned} \quad (5)$$

где $x = [q, \dot{q}]^T$ (здесь и далее будем для простоты опускать индекс m).

Уравнения наблюдающего устройства системы имеют ту же форму [1]:

$$\begin{aligned}\dot{\hat{x}}(t) &= A\hat{x}(t) + b(u(t) + \hat{\sigma}(t)), \quad \hat{x}(0) = 0, \\ \hat{y}(t) &= c^T \hat{x}(t),\end{aligned}\quad (6)$$

где через $\hat{\bullet}$ обозначаются наблюдаемые величины (оценки вектора состояний).

Ошибка оценки определяется следующим уравнением:

$$\varepsilon(t) = x(t) - \hat{x}(t). \quad (7)$$

Из (5) и (6) вытекает, что

$$\dot{\varepsilon}(t) = A\varepsilon(t) + b\tilde{\sigma}(t), \quad (8)$$

где $\tilde{\sigma}(t) = \sigma(t) - \hat{\sigma}(t)$.

В соответствии с теорией адаптивного управления L_1 [1,2] управляющий сигнал системы в операторном виде дается следующим уравнением:

$$u(s) = C(s)(k_g r(s) - \hat{\sigma}(s)), \quad (9)$$

где $C(s)$ – передаточная функция низкочастотного фильтра ($C(0) = 1$), а

$$k_g = -1 / (c^T A^{-1} b). \quad (10)$$

В качестве закона компенсации возмущений на основе общей теории адаптивного управления с эталонной моделью имеем [1,2]

$$\dot{\hat{\sigma}}(t) = \Gamma b^T P \varepsilon(t), \quad (11)$$

где Γ – коэффициент адаптации, который выбирается исходя из требуемой скорости адаптации. Проблема устойчивости системы адаптивного управления рассмотрена в [6], где показано, что данная система управления асимптотически устойчива при любых значениях Γ .

На рис. 4 приведена блок-схема системы с наблюдающим устройством и адаптивным законом компенсации возмущений.

Можно показать, что уравнения движения адаптивной системы с наблюдающим устройством имеют в операторной форме вид

$$y(s) = w(s)C(s)k_g r(s) + w(s)[1 - C(s)[1 + w_0(s)]^{-1} w_0(s)]\sigma(s), \quad (12)$$

где $w_0(s)$ – передаточная функция замкнутого контура адаптивной системы управления, которая дается следующим выражением:

$$w_0(s) = \frac{\Gamma}{s} b^T P (sI - A)^{-1} b. \quad (13)$$

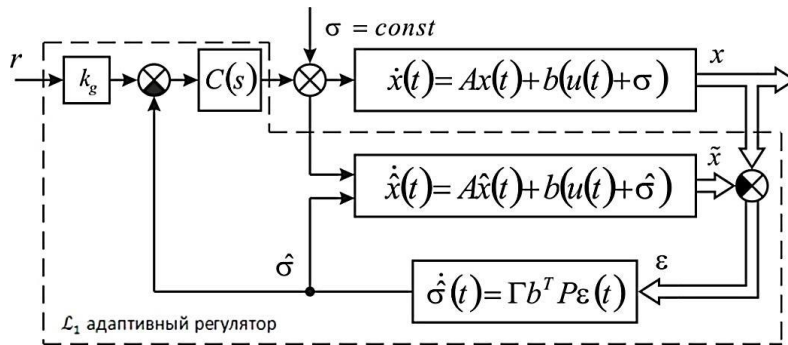


Рис. 4. Структурная схема замкнутой адаптивной системы управления L_1

В среде SIMULINK программного пакета MATLAB разработана динамическая модель приведенной адаптивной системы на основе нелинейных взаимосвязанных уравнений движения 6 - степенного антропоморфического робота-манипулятора PUMA 560 [7] при следующих значениях параметров регулятора обратной динамики: $K_0 = 4$, $K_1 = 5$, $\sigma \in [-0,003, 0,003]$. Моделирование было проведено при следующих значениях Γ : 10^5 , 10^6 , 10^7 . Отметим, что при моделировании системы учитывалось также сухое (кулоново) трение в механических передачах: $M_{FrC} = 0,0005$.

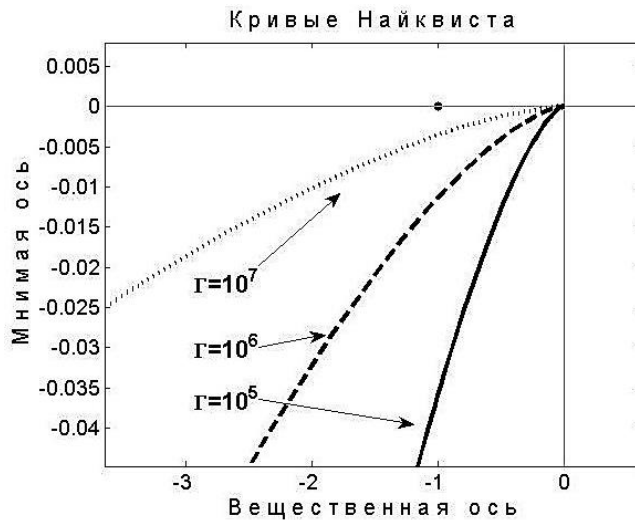


Рис. 5. Кривые Найквиста передаточной функции $w_0(s)$ (13) при разных значениях коэффициента Γ

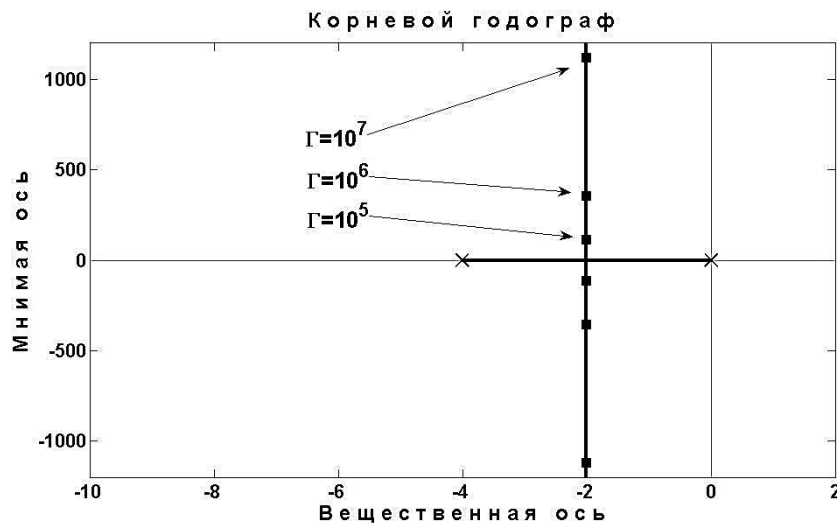


Рис. 6. Корневые годографы замкнутой системы с передаточной функцией $w_0(s)$ (13) при изменении коэффициента Γ

На рис. 5 и 6 приведены частотные и корневые характеристики передаточной функции $w_0(s)$ (13). Из корневого годографа видно, что увеличение скорости адаптации Γ действительно не влияет на устойчивость системы, так как при увеличении коэффициента Γ корни замкнутой адаптивной системы двигаются в бесконечность параллельно мнимой оси, оставаясь в левой полуплоскости.

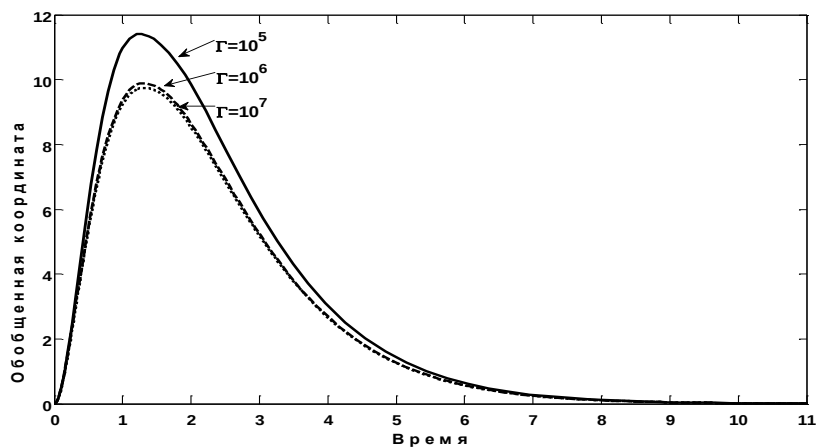


Рис. 7. График изменения обобщенной координаты первого звена

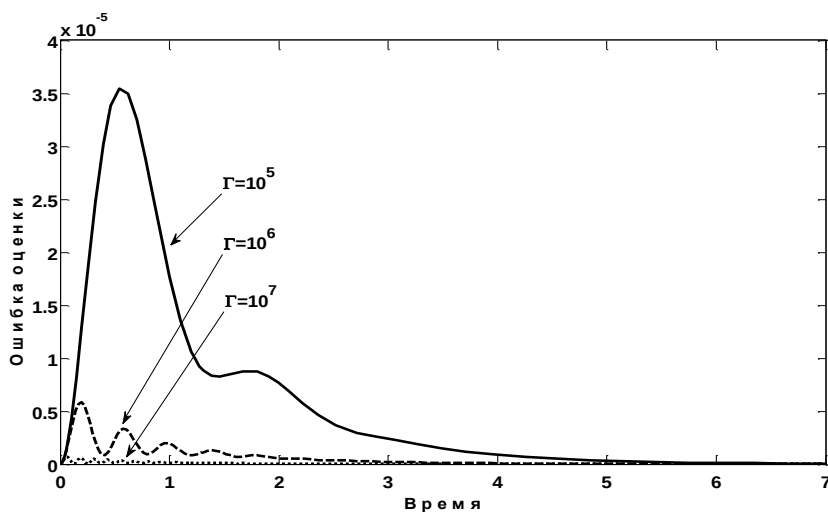


Рис. 8. График изменения ошибки предсказания

В качестве примера графики на рис. 7 и 8 описывают переходные процессы в отдельном (в данном случае - первом) звене манипулятора при различных значениях коэффициента адаптации Γ .

Приведенные результаты исследования позволяют утверждать, что применение принципов L_1 адаптивного управления в сочетании с методом обратной динамики дает возможность получать большие значения коэффициента адаптации без потери устойчивости системы управления ИР, обеспечивая в то же время независимость движения отдельных звеньев последней.

Исследование выполнено при финансовой поддержке ГКН МОН РА в рамках научного проекта № SCS 13-2B305.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Hovakimyan N. and Cao C.** L1 Adaptive Control Theory.- Philadelphia, 2010.
2. **Cao C. and Hovakimyan N.** Design and Analysis of a Novel L1 Adaptive Control Architecture with Guaranteed Transient Performance // IEEE Transactions on Automatic Control. - March, 2008. - Vol. 53, №2.- P. 586-591.
3. **Mark W. Spong, Seth Hutchinson, and M. Vidyasagar.** Robot Modeling and Control. – 2006.- 478 p.
4. **Бесекерский В.А., Попов Е.П.** Теория систем автоматического регулирования.- М.: Наука, 2003. – 560 с.
5. **Буниятян Л.М.** Проектирование системы управления искусственной руки с учетом динамики исполнительных двигателей // Известия НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. - 2013. - Т. 66, N1. - С. 35-45.

6. **Արաքյան Ս.Գ.** Արհեստական ձեռքի ադապտիվ կառավարման համակարգի մշակումը հակադարձ դինամիկայի մեթոդով // ՀՊՃՀ (Պոլիտեխնիկ) տարեկան գիտաժողովի նյութերի ժողովածու. Մաս 1.- Երևան, 2013.- էջ 192-196:
7. **Corke Peter I.** The Unimation Puma Servo System, CSIRO. - Australia, 1994.- 54 p.

ГИУА (ПОЛИТЕХНИК). Материал поступил в редакцию 21.02.2014.

Օ.Ն. ԳԱՍՊԱՐՅԱՆ, Ս.Գ. ԱՐԱԲՅԱՆ

**ԱՐՀԵՍՏԱԿԱՆ ՁԵՌՔԻ L_1 ԱՂԱՊՏԻՎ ԿԱՌԱՎԱՐՄԱՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳԻ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԸ
ՀԱԿԱՂԱՐԶ ԴԻՆԱՄԻԿԱՅԻ ՄԵԹՈԴԻ ԿԻՐԱՌՄԱՄԲ**

Կատարվել է ազատության N աստիճան ունեցող արհեստական ձեռքի հետազոտում՝ գործադիր շարժիչների դինամիկայի հաշվառմամբ: Արտաքին անհայտ վրդովմունքի ազդեցության չեզոքացման նպատակով մշակվել է արհեստական ձեռքի առանձին օղակների L_1 ադապտիվ կառավարման համակարգ:

Առանցքային բառեր. վերին արհեստական վերջույթ, ռոբոտ-մանիպուլյատոր, L_1 ադապտիվ կառավարման համակարգ, հակադարձ դինամիկայի մեթոդ:

O.N. GASPARYAN, S.G. ARABYAN

**INVESTIGATING THE L_1 ADAPTIVE CONTROL SYSTEM OF AN ARTIFICIAL
ARM BY USING THE METHOD OF INVERSE DYNAMICS**

A control system of an N -degree-of-freedom artificial arm is investigated considering the dynamics of executive motors. In order to compensate the external unknown disturbances, an L_1 adaptive control system is designed for each link of the artificial arm.

Keywords: upper artificial limb, robot-manipulator, L_1 adaptive control system, method of inverse dynamics.

А.Г. АВЕТИСЯН, Л.С. ГЮЛЬЗАДЯН

**МЕТОД РЕШЕНИЯ МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ЗАДАЧ
ЛИНЕЙНОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ, ОСНОВАННЫЙ НА
ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЯХ**

Разработан метод решения задач многопараметрического линейного программирования (ЛП) с параметрическими зависимостями в коэффициентах целевой функции или правых частях ограничений. Метод основан на дифференциально-тейлоровских (ДТ) преобразованиях Г.Е. Пухова и симплекс-преобразованиях ЛП. Предложенный алгоритм проиллюстрирован на примере планировки производства нефтеперерабатывающей компании.

Ключевые слова: многопараметрические задачи линейного программирования, дифференциальные преобразования, интервалы оптимальности и допустимости, условия оптимальности и допустимости, симплекс-преобразования.

Введение. Использование ограниченных ресурсов, минимизация издержек, обеспечение максимальной выгоды, а также требования рынка приводят к необходимости исследования влияния вариации тех или иных параметров конкретной задачи на оптимальное решение. На практике эти изменения наиболее часто представляются в виде многопараметрических зависимостей. Используя изложенный в [1, 2] подход для решения задач ЛП с параметрическими коэффициентами целевой функции и правых частей ограничений, в данной работе на основе симплекс [3] и дифференциальных преобразований Г.Е. Пухова [4-7] предложен метод решения многопараметрических задач ЛП.

Теоретические основы. С целью применения изложенного в [1, 2] подхода для многопараметрического случая сначала рассмотрим многомерные дифференциальные преобразования Пухова [4-7]:

- прямое преобразование:

$$U(K_1, K_2, \dots, K_n) = \frac{H_1^{K_1} H_2^{K_2} \dots H_n^{K_n}}{K_1! K_2! \dots K_n!} \left[\frac{\partial^{K_1+K_2+\dots+K_n} u(t_1, t_2, \dots, t_n)}{\partial t_1^{K_1} \partial t_2^{K_2} \dots \partial t_n^{K_n}} \right]_{t=t_v}, \quad K = (K_1, K_2, \dots, K_n) = \overline{0, \infty}; \quad (1)$$

- обратное преобразование:

$$u(t_1, t_2, \dots, t_n) = \sum_{f=0}^{\infty} \sum_{K_1+K_2+\dots+K_n=f} \left(\frac{t_1-t_v}{H_1} \right)^{K_1} \left(\frac{t_2-t_v}{H_2} \right)^{K_2} \dots \left(\frac{t_n-t_v}{H_n} \right)^{K_n} U(K_1, K_2, \dots, K_n), \quad (2)$$

где $H = (H_1, H_2, \dots, H_n)$ - вектор некоторых положительных масштабных коэффициентов; $t = (t_1, t_2, \dots, t_n)$ - вектор координат центра аппроксимации; $U = (K_1, K_2, \dots, K_n)$ - дискретная функция целочисленных аргументов; $K_1, K_2, \dots, K_n$ - дифференциальный спектр оригинала $u(t_1, t_2, \dots, t_n)$.

Математические модели задач ЛП с многопараметрическими зависимостями в коэффициентах целевой функции и правых частях ограничений можно представить следующим образом соответственно:

$$f(X) = c_1(t_1, t_2, \dots, t_l) \cdot x_1 + c_2(t_1, t_2, \dots, t_l) \cdot x_2 + \dots + c_n(t_1, t_2, \dots, t_l) \cdot x_n \rightarrow \underset{x \in D}{extr},$$

$$D: \begin{cases} AX \leq b, \\ x_1 \geq 0, \dots, x_n \geq 0; \end{cases} \quad (3)$$

$$f(X) = c_1 \cdot x_1 + c_2 \cdot x_2 + \dots + c_n \cdot x_n \rightarrow \underset{x \in D}{extr},$$

$$D: \begin{cases} AX \leq b(t_1, t_2, \dots, t_l), \\ x_1 \geq 0, \dots, x_n \geq 0. \end{cases} \quad (4)$$

Применяя вышеизложенные прямые дифференциальные преобразования (1) по отношению к элементам с функциональными зависимостями в (3)-(4), получаем соотношения для вычисления ДТ-изображений соответствующих симплекс-преобразований, подробно описанных в работах [1,2].

1. Параметрическое изменение коэффициентов целевой функции:

$$\Delta_j^{(q)}(K_1, K_2, \dots, K_l) = \Delta_j^{(q-1)}(K_1, K_2, \dots, K_l) - \frac{a_{i_0 j}^{(q-1)}}{a_{i_0 j_0}^{(q-1)}} \Delta_{j_0}^{(q-1)}(K_1, K_2, \dots, K_l), \quad (5)$$

$$j = \overline{1, n+m}, \quad K = (K_1, K_2, \dots, K_l) = \overline{0, \infty}.$$

2. Параметрическое изменение правых частей ограничений:

$$X_{Bi_0}^{(q)}(K_1, K_2, \dots, K_l) = \frac{1}{a_{i_0 j_0}^{(q-1)}} \cdot X_{Bi_0}^{(q-1)}(K_1, K_2, \dots, K_l), \quad (6)$$

$$j = \overline{1, n+m}, \quad K = (K_1, K_2, \dots, K_l) = \overline{0, \infty},$$

$$X_{bi}^{(q)}(K_1, K_2, \dots, K_l) = X_{bi}^{(q-1)}(K_1, K_2, \dots, K_l) - \frac{a_{ij_0}^{(q-1)}}{a_{i_0 j_0}^{(q-1)}} \cdot X_{bi_0}^{(q-1)}(K_1, K_2, \dots, K_l), \quad (7)$$

$$i \neq i_0, \quad j = \overline{1, n+m}, \quad K = (K_1, K_2, \dots, K_l) = \overline{0, \infty}.$$

Интервалы оптимальности и допустимости определяются решением задач математического программирования соответственно:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^l \bar{t}_i &\rightarrow \max_t & \sum_{i=1}^l \underline{t}_i &\rightarrow \min_t \\ -\Lambda_j(\bar{t}_1, \bar{t}_2, \dots, \bar{t}_l) &\leq 0, j = 1, \dots, n, & \Lambda_j(\underline{t}_1, \underline{t}_2, \dots, \underline{t}_l) &\geq 0, j = 1, \dots, n, \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^l \bar{t} &\rightarrow \max_t & \sum_{i=1}^l \bar{t} &\rightarrow \min_t \\ -\beta_j(\bar{t}_1, \bar{t}_2, \dots, \bar{t}_l) &\leq 0, j = 1, \dots, m, & -\beta_j(\underline{t}_1, \underline{t}_2, \dots, \underline{t}_l) &\leq 0, j = 1, \dots, m. \end{aligned} \quad (9)$$

Практический пример. Целью нефтеперерабатывающей компании, специализирующейся в производстве и смешивании нефти, является максимизация прибыли и выбор оптимального сочетания сырья, продуктов [8]. Условия эксплуатации приведены в табл. 1.

Таблица 1

Условия эксплуатации НПЗ

Продукты	Сырая нефть 1	Сырая нефть 2	Максимально допустимый объем производства (барр. / день)
Бензин	80	44	$2400 + \theta_1$ ($0 \leq \theta_1 \leq 6000$)
Керосин	5	10	$2000 + \theta_2$ ($0 \leq \theta_2 \leq 500$)
Мазут	10	36	6000
Остаток	5	10	-
Стоимость обработки (долл. США / барр)	0,50	1,00	-

Математическая модель имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} z = 8,1x_1 + 10,8x_2 &\rightarrow \max_{x_1, x_2}, \\ \begin{cases} 0,8x_1 + 0,44x_2 \leq 24000 + \theta_1, \\ 0,05x_1 + 0,1x_2 \leq 2000 + \theta_2, \\ 0,1x_1 + 0,36x_2 \leq 6000, \\ 0 \leq \theta_1 \leq 6000, \\ 0 \leq \theta_2 \leq 500, \\ x_1 \geq 0, x_2 \geq 0, x_3 \geq 0, \end{cases} \end{aligned}$$

где θ_1 и θ_2 - параметры, представляющие дополнительный максимально допустимый объем производства бензина и керосина соответственно; x_1 и x_2 - скорости потоков сырой нефти 1 и 2 (баррелей / день).

Ход решения данной задачи предложенным методом приведен в табл. 2-8 при $K_1 = 2$, $K_2 = 2$ и $H_1 = 1$, $H_2 = 1$. В качестве начального центра аппроксимации выбрана точка $\theta = [\theta_1, \theta_2] = [0, 0]$.

Итерация 1. Определение оптимального решения и интервала допустимости полученного решения, $\theta = [\theta_1, \theta_2] = [0, 0]$; $K_1 = 2$, $K_2 = 2$; $H_1 = 1$, $H_2 = 1$.

Таблица 2

Шаг 1

I_B	X_B	a_1	$j_0 \rightarrow a_2$	a_3	a_4	a_5
3	$x_3(k_1 k_2) = \begin{bmatrix} 24000 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	0,8	0,44	1	0	0
4	$x_4(k_1 k_2) = \begin{bmatrix} 2000 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	0,05	0,1	0	1	0
$i_0 \rightarrow 5$	$x_5(k_1 k_2) = \begin{bmatrix} 6000 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	0,1	0,36	0	0	1
	Δ	-8,1	-10,8	0	0	0

Таблица 3

Шаг 2

I_B	X_B	$j_0 \rightarrow a_1$	a_2	a_3	a_4	a_5
3	$x_3(k_1 k_2) = \begin{bmatrix} 16666,666 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	0,677777	0	1	0	-1,222222
$i_0 \rightarrow 4$	$x_4(k_1 k_2) = \begin{bmatrix} 333,333 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	0,022222	0	0	1	-0,277777
2	$x_2(k_1 k_2) = \begin{bmatrix} 16666,666 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	0,277777	1	0	0	2,777777
	Δ	-5,1	0	0	0	30

Таблица 4

Шаг 3

I_B	X_B	a_1	a_2	a_3	a_4	$j_0 \rightarrow a_5$
$i_0 \rightarrow 3$	$x_3(k_1 k_2) = \begin{bmatrix} 6500 & -30,5 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	0	0	1	-30,5	7,25
1	$x_1(k_1 k_2) = \begin{bmatrix} 15000 & 45 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	1	0	0	45	-12,5
2	$x_2(k_1 k_2) = \begin{bmatrix} 12500 & -12,5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	0	1	0	-12,5	6,25
	Δ	0	0	0	229,5	-33,75

Таблица 5

Шаг 4

I_B	X_B	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
5	$x_5(k_1 k_2) = \begin{bmatrix} 896,551 & -4,206896 & 0 \\ 0,132793 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	0	0	0,137931	-4,2069	1
1	$x_1(k_1 k_2) = \begin{bmatrix} 26206,896 & -7,5862 & 0 \\ 1,724138 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	1	0	1,72414	-7,58621	0
2	$x_2(k_1 k_2) = \begin{bmatrix} 6896,551 & 13,793 & 0 \\ -0,862068 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	0	1	-0,86207	13,7931	0
	Δ	0	0	4,655172	87,5	0

Шаг 5. Восстановление оригиналов согласно обратному ДТ-преобразованию (2):

$$x_1(\theta_1, \theta_2) = 26206,896 \cdot (\theta_1 - 0)^0 (\theta_2 - 0)^0 + 1,724138 \cdot (\theta_1 - 0)^1 (\theta_2 - 0)^0 - 7,5862 \cdot (\theta_1 - 0)^0 (\theta_2 - 0)^1 + 0 \cdot (\theta_1 - 0)^1 (\theta_2 - 0)^1 = 1,724138\theta_1 - 7,5862\theta_2 + 26206,896;$$

$$x_2(\theta_1, \theta_2) = 6896,551 \cdot (\theta_1 - 0)^0 (\theta_2 - 0)^0 - 0,862068 \cdot (\theta_1 - 0)^1 (\theta_2 - 0)^0 + 13,793 \cdot (\theta_1 - 0)^0 (\theta_2 - 0)^1 + 0 \cdot (\theta_1 - 0)^1 (\theta_2 - 0)^1 = -0,862068\theta_1 + 13,793\theta_2 + 6896,551;$$

$$x_5(\theta_1, \theta_2) = 896,551 \cdot (\theta_1 - 0)^0 (\theta_2 - 0)^0 + 0,13793 \cdot (\theta_1 - 0)^1 (\theta_2 - 0)^0 - 4,206896 \cdot (\theta_1 - 0)^0 (\theta_2 - 0)^1 + 0 \cdot (\theta_1 - 0)^1 (\theta_2 - 0)^1 = 0,13793\theta_1 - 4,206896\theta_2 + 896,551;$$

$$z(\theta_1, \theta_2) = 4,655172\theta_1 + 87,5\theta_2 + 286758,6.$$

Шаг 6. Определение значений параметров θ_1 и θ_2 по (9), при которых полученное решение остается допустимым:

$$\begin{cases} -\theta_1 - \theta_2 \rightarrow \max, \\ \begin{cases} -0,13793\theta_1 + 4,206896\theta_2 \leq 896,551 \\ -1,724138\theta_1 + 7,5862\theta_2 \leq 26206,896 \\ 0,862068\theta_1 - 13,793\theta_2 \leq 6896,551 \\ \theta_1 \leq 6000, \\ \theta_2 \leq 500 \end{cases} \end{cases} \Rightarrow \theta_1 = 6000; \theta_2 = 409,8.$$

Итерация 2. Определение оптимального решения и интервала допустимости полученного решения при $\theta = [\theta_1, \theta_2] = [6000, 410]$.

Таблица 6

Шаг 1

I_B	X_B	a_1	$j_0 \rightarrow a_2$	a_3	a_4	a_5
3	$x_3(k_1, k_2) = \begin{bmatrix} 30000 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	0,8	0,44	1	0	0
4	$x_4(k_1, k_2) = \begin{bmatrix} 2410 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	0,05	0,1	0	1	0
$i_0 \rightarrow 5$	$x_5(k_1, k_2) = \begin{bmatrix} 6000 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	0,1	0,36	0	0	1
	Δ	-8,1	-10,8	0	0	0

Таблица 7

Шаг 2

I_B	X_B	$j_0 \rightarrow a_1$	a_2	a_3	a_4	a_5
$i_0 \rightarrow 3$	$x_3(k_1 k_2) = \begin{bmatrix} 22666,666 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	0,677777	0	1	0	-1,222222
4	$x_4(k_1 k_2) = \begin{bmatrix} 743,333 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	0,022222	0	0	1	-0,277777
2	$x_2(k_1 k_2) = \begin{bmatrix} 16666,666 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	0,277777	1	0	0	2,777777
	Δ	-5,1	0	0	0	30

Таблица 8

Шаг 3

I_B	X_B	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
1	$x_1(k_1 k_2) = \begin{bmatrix} 33442,625 & 0 & 0 \\ 1,4754 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	1	0	1,475579	0	-1,8032
4	$x_4(k_1 k_2) = \begin{bmatrix} 0,164615 & 1 & 0 \\ -0,0327868 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	0		-0,0327868	1	-0,2377
2	$x_2(k_1 k_2) = \begin{bmatrix} 7344,05 & 0 & 0 \\ -0,409836 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	0		-0,409836	0	3,27868
	Δ	0		7,5245	0	20,8032

Шаг 4. Восстановление оригиналов согласно обратному ДТ-преобразованию (2) в центре аппроксимации $\theta = [\theta_1, \theta_2] = [6000, 410]$:

$$x_1(\theta_1, \theta_2) = 33442,625 \cdot (\theta_1 - 6000)^0 (\theta_2 - 410)^0 + 0 \cdot (\theta_1 - 6000)^1 (\theta_2 - 410)^0 + \\ + 1,4754 \cdot (\theta_1 - 6000)^0 (\theta_2 - 410)^1 + 0 \cdot (\theta_1 - 0)^1 (\theta_2 - 0)^1 = 1,4754\theta_1 + 24590,225;$$

$$x_2(\theta_1, \theta_2) = 7377,05 \cdot (\theta_1 - 6000)^0 (\theta_2 - 410)^0 + 0 \cdot (\theta_1 - 6000)^1 (\theta_2 - 410)^0 - \\ - 0,409836 \cdot (\theta_1 - 6000)^0 (\theta_2 - 410)^1 + 0 \cdot (\theta_1 - 6000)^1 (\theta_2 - 410)^1 = -0,409836\theta_1 + 9836,066;$$

$$x_4(\theta_1, \theta_2) = 0,164615 \cdot (\theta_1 - 6000)^0 (\theta_2 - 410)^0 + 1 \cdot (\theta_1 - 6000)^1 (\theta_2 - 410)^0 - \\ - 0,0327868 \cdot (\theta_1 - 6000)^0 (\theta_2 - 410)^1 + 0 \cdot (\theta_1 - 6000)^1 (\theta_2 - 410)^1 = -0,0327868\theta_1 + \theta_2 - 213,114585 ; \\ z(\theta_1, \theta_2) = 7,5245\theta_1 + 305409,84.$$

Окончательное решение приведено в табл. 9.

Таблица 9

Решение примера

$\theta = [\theta_1, \theta_2]$	$X = (x_1, x_2)$	z
$0 \leq \theta_1 < 6000$ $0 \leq \theta_2 \leq 409,8$	$x_1(\theta_1, \theta_2) = 1,724138\theta_1 - 7,5862\theta_2 + 26206,896$ $x_2(\theta_1, \theta_2) = -0,862068\theta_1 + 13,793\theta_2 + 6896,551$	$z(\theta_1, \theta_2) = 4,655172\theta_1 +$ $+87,5\theta_2 + 286758,6$
$\theta_1 = 6000$ $410 \leq \theta_2 \leq 500$	$x_1(\theta_1, \theta_2) = 1,4754\theta_1 + 24590,225$ $x_2(\theta_1, \theta_2) = -0,409836\theta_1 + 9836,066$	$z(\theta_1, \theta_2) = 7,5245\theta_1 + 305409,84$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гюльзаян Л.С. К решению одного класса параметрических задач линейного программирования // Вестник ГИУА. Серия “Моделирование, оптимизация, управление”. - Ереван, 2011. - Вып. 14, том 2. - С 130-137.
2. Գրուցադյան Լ.Ս. Նպատակային ֆունկցիայի պարամետրական գործակիցներով գծային ծրագրավորման խնդիրների լուծման եղանակ՝ հիմնված դիֆերենցիալ ձևափոխությունների վրա // ՀՊՃՀ ԼԴԱԲԵԴ. Գիտական հոդվածների ժողովածու. - Երևան, 2012. - Մաս 1. - Էջ. 341-347:
3. Таха Х. Введение в исследование операций. - М.: Мир, 2005. - 912 с.
4. Пухов Г.Е. Дифференциальные преобразования функций и уравнений. - Киев: Наукова думка, 1980. - 419 с.
5. Пухов Г.Е. Дифференциальные преобразования и математическое моделирование физических процессов. – Киев: Наукова думка, 1986. - 158 с.
6. Пухов Г.Е. Дифференциальные спектры и модели. – Киев: Наукова думка, 1990. – 230 с.
7. Симонян С.О., Аветисян А.Г. Прикладная теория дифференциальных преобразований: Монография. - Ереван: Издательство ГИУА “Չարտարետ”, 2010. - 361с.
8. Faisca N.P., Dua V., Pistikopoulos E.N. Multiparametric Linear and Quadratic Programming. - Weinheim, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co, 2007. - 23p.

ГИУА (ПОЛИТЕХНИК). Материал поступил в редакцию 10.04.2014.

Ա.Գ. ԱՎԵՏԻՍՅԱՆ, Լ.Ս. ԳՅՈՒԼԶԱԴՅԱՆ

**ԲԱԶՄԱՊԱՐԱՄԵՏՐԱԿԱՆ ԳԾԱՅԻՆ ԾՐԱԳՐԱՎՈՐՄԱՆ ԽՆԴԻՐՆԵՒ ԼՈՒԾՄԱՆ
ՄԵԹՈԴ՝ ՀԻՄՆՎԱԾ ԴԻՖԵՐԵՆՑԻԱԼ ԶԵՎԱՓՈԽՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՎՐԱ**

Առաջարկված է մեթոդ՝ նպատակային ֆունկցիայի գործակիցների կամ սահմանափակումների ազատ անդամների բազմապարամետրական կախվածություններով գծային ծրագրավորման խնդիրների լուծման համար: Մեթոդը հիմնված է գծային ծրագրավորման սիմպլեքս և Գ. Ե. Պուխովի դիֆերենցիալ-թեյլորյան ձևափոխությունների վրա: Առաջարկված ալգորիթմը լուսաբանված է նավթամշակման ընկերության արտադրության պլանավորման գործնական օրինակով:

Առանցքային բառեր. բազմապարամետրական գծային ծրագրավորման խնդիրներ, դիֆերենցիալ ձևափոխություններ, օպտիմալության և թույլատրելիության միջակայքեր, օպտիմալության և թույլատրելիության պայմաններ, սիմպլեքս ձևափոխություններ:

A.G. AVETISYAN, L.S. GYULZADYAN

**A METHOD FOR SOLVING MULTIPARAMETRIC LINEAR PROGRAMMING
PROBLEMS BASED ON DIFFERENTIAL TRANSFORMS**

A method for solving multiparametric linear programming (LP) problems with dependencies in coefficients of objective function or right-hand sides of constraints is developed. The method is based on differential Taylor transforms (DT) of G.E.Pukhov and the LP simplex transforms. The proposed algorithm is shown on the example of planning the production of an oil-processing company.

Keywords: multiparametric linear programming problems, differential transforms, optimality and feasibility conditions, optimality and feasibility intervals, simplex transforms.

УДК 629.7.05:681.518.25

АВТОМАТИЗАЦИЯ И
СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

А.А. БАГИЯН

**О НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЯХ В ДИНАМИКЕ СИСТЕМ СОПРОВОЖДЕНИЯ
НАЗЕМНЫХ ОБЪЕКТОВ С ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

Рассмотрена динамика систем сопровождения наземных объектов с летательных аппаратов. Выявлены неопределенности в динамике систем сопровождения, влияющие на качество реализации задачи управления. Проведена оценка степени воздействия этих неопределенностей на динамику систем.

Ключевые слова: летательный аппарат, сопровождение, динамика системы, неопределенность в модели системы.

Введение. Системы сопровождения объектов являются одними из основных в составе обзорно-прицельных комплексов современных летательных аппаратов (ЛА). Для сопровождения объектов в обзорно-прицельных комплексах необходимо визирную линию, соединяющую центр подвижной марки (в виде перекрестия, квадрата, круга или иной геометрической фигуры) с ее проекцией на земной поверхности, постоянно наводить на эти объекты. Системы сопровождения (рис. 1), как системы автоматического управления, в общем случае состоят из [1]

- задающего устройства;
- корректирующего устройства (КУ);
- объекта управления;
- датчика угла (ДУ).

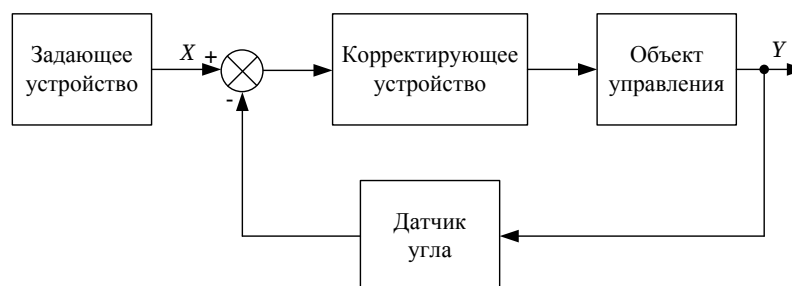


Рис. 1. Система сопровождения объектов с ЛА

Корректирующее устройство представляет собой регулятор, улучшающий качество управления и обеспечивающий заданные динамические свойства системы сопровождения. Объект управления – неизменяемая часть системы сопровождения, включающая электродвигатель с механическими исполнительными элементами

и платформу с информационно-измерительной аппаратурой обзорно-прицельного комплекса. Датчик угла измеряет отработанные объектом управления координаты и подает их на сравнение с координатами, поступающими из задающего устройства, для обеспечения отрицательной обратной связи (ООС). Регулятор, объект управления и ДУ, заключенные в контур ООС, образуют следящую систему ориентации визирной линии. Динамика системы сопровождения в целом определяется именно составом и принципом действия следящей системы.

1. Обобщенные уравнения динамики системы сопровождения. Рассмотрим процесс сопровождения наземной цели с ЛА, суть которого состоит в отработке ее двух угловых координат, поступающих из задающего устройства. Непосредственно отработка заданных координат производится объектом управления (электродвигателями и механическими исполнительными устройствами).

Данная система имеет две степени свободы, следовательно, ее динамику можно описать с помощью двух обобщенных координат q_1, q_2 – углов поворота визирной линии для ее наведения на наземный объект. Кинематическая схема системы ориентации визирной линии представлена на рис. 2.

Для вывода уравнений динамики объекта управления введем следующие системы координат (СК). В качестве базовой выберем связанную с ЛА систему координат $OX_1Y_1Z_1$ (рис. 2). Системы координат $OX_2Y_2Z_2, OX_3Y_3Z_3$ выбираем таким образом, чтобы они были правыми, а повороты на положительные углы q_1, q_2 происходили вокруг осей OZ_2 и OZ_3 соответственно.

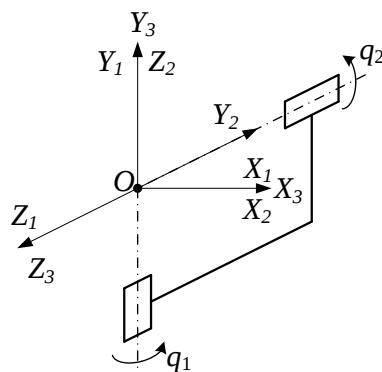


Рис. 2. Кинематическая схема системы ориентации визирной линии

Сведем в таблицу параметры Денавита-Хартенберга [2] $\alpha_i, a_i, d_i, \theta_i, i=1,2,3$ для данной кинематической схемы, где α_i – угол между осями OZ_i и OZ_{i+1} относительно оси OX_i ; a_i – расстояние между осями OZ_i и OZ_{i+1} вдоль оси OX_i ; d_i – расстояние между осями OX_{i-1} и OX_i вдоль оси OZ_i ; θ_i – угол между осями OX_{i-1} и OX_i относительно оси OZ_i .

Таблица

Параметры Денавита-Хартенберга

i	α_{i-1}	a_{i-1}	d_i	θ_i
2	-90°	0	0	q_1
3	90°	0	0	q_2

При этом СК $\{i\}$ определяется в СК $\{i-1\}$ следующей матрицей преобразований [2-5]:

$${}^{i-1}_iT = \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i & 0 & a_{i-1} \\ s\theta_i c\alpha_{i-1} & c\theta_i c\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1}d_i \\ s\theta_i s\alpha_{i-1} & c\theta_i s\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1}d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где $c\theta_i$, $s\theta_i$ и $c\alpha_{i-1}$, $s\alpha_{i-1}$ – короткие обозначения косинусов и синусов углов θ_i и α_{i-1} соответственно.

Уравнение динамики механической части системы в общем случае представляется в форме Эйлера-Лагранжа следующим образом [2-5]:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} - \frac{\partial L}{\partial q} = \tau, \quad (2)$$

где L – лагранжиан, который определяется как разность между кинетической K и потенциальной P энергией системы; q – обобщенные координаты системы; τ – обобщенные внешние силы.

Будем считать, что механическая часть системы сбалансирована, а потенциальная энергия P системы является постоянной. Тогда выражение (2) можно записать в виде

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial K}{\partial \dot{q}} - \frac{\partial K}{\partial q} = \tau. \quad (3)$$

Кинетическая энергия системы, кинематическая схема которой представлена на рис. 2, определяется известными выражениями следующим образом [3]:

$$K = \sum_{i=1}^n K_i = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \text{Trace} \left[\sum_{j=1}^i \sum_{k=1}^i \left(\frac{\partial T_i}{\partial q_j} I_i \frac{\partial T_i^T}{\partial q_k} \right) \frac{dq_j}{dt} \frac{dq_k}{dt} \right], \quad (4)$$

где $n = 2$ – число степеней свободы системы; $\text{Trace} [R]$ – обозначает след матрицы R ; T_i – матрица однородных преобразований от базовой СК к i -й системе

координат, а матрица I_i размерности 4×4 представляет собой матрицу (тензор) псевдоинерции [3] и выражается так:

$$I_i = \begin{bmatrix} \frac{-I_{ixx} + I_{iyy} + I_{izz}}{2} & I_{ixy} & I_{ixz} & 0 \\ I_{ixy} & \frac{I_{ixx} - I_{iyy} + I_{izz}}{2} & I_{iyz} & 0 \\ I_{ixz} & I_{iyz} & \frac{I_{ixx} + I_{iyy} - I_{izz}}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_i \end{bmatrix},$$

где m – масса i -го тела, кг; I_{ixx} , I_{iyy} , I_{izz} – центральные моменты инерции относительно осей x , y , z , $\text{кг} \cdot \text{м}^2$; I_{ixy} , I_{ixz} , I_{iyz} – центробежные моменты инерции, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$.

Подставляя выражения (4) в (3), после несложных преобразований в скалярной форме получаем [3]

$$\sum_{j=1}^n m_{ij}(q) \frac{d^2 q}{dt^2} + c_i \left(q, \frac{dq}{dt} \right) = \tau_i, \quad (5)$$

$$i = 1, 2,$$

или в векторной форме:

$$M(q) \frac{d^2 q}{dt^2} + C \left(q, \frac{dq}{dt} \right) = \tau, \quad (6)$$

где элементы $m_{ij}(q)$ и $c_i(q, dq/dt)$ выражаются через тензор псевдоинерции в следующем виде:

$$m_{ij}(q) = \sum_{p=1}^n \text{Trace} \left(\frac{\partial T_p}{\partial q_j} I_p \frac{\partial T_p^T}{\partial q_i} \right),$$

$$c_i \left(q, \frac{dq}{dt} \right) = \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n c_{ijk} \left(q, \frac{dq}{dt} \right) \frac{dq_j}{dt} \frac{dq_k}{dt}, \quad i = 1, 2.$$

Здесь $c_{ijk}(q, dq/dt)$ – символы Кристоффеля первого рода, определяемые по известным выражениям [4].

Производные матриц T_i по скалярным координатам q_i (где последние измеряются относительно соответствующих осей Z_i) можно представить следующим образом [4, 5]:

$$\frac{\partial T_i}{\partial q_j} = S T_i,$$

где S – кососимметрическая матрица ($S = -S^T$):

$$S = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Для данной системы производные матриц T_i выражаются в виде

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_1}{\partial q_1} &= S^1_2 T, \quad \frac{\partial T_2}{\partial q_1} = S^1_2 T^2_3 T, \quad \frac{\partial T_2}{\partial q_2} = {}^1_2 T S^2_3 T, \\ \frac{\partial^2 T_1}{\partial q_1^2} &= S^2_2 T, \quad \frac{\partial^2 T_2}{\partial q_1^2} = S^2_2 T^2_3 T, \quad \frac{\partial^2 T_2}{\partial q_1 \partial q_2} = S^1_2 T S^2_3 T, \quad \frac{\partial^2 T_2}{\partial q_2^2} = {}^1_2 T S^2_2 T, \end{aligned}$$

где матрицы ${}^{i-1}_i T$, $i = 2, 3$ определяются выражением (1) по приведенным в таблице параметрам. Далее подробно рассмотрим модель системы сопровождения с учетом динамики ее исполнительных устройств.

2. Динамика системы сопровождения с учетом параметров исполнительных устройств. Управление ориентацией визирной линии осуществляется изменением моментов $\tau_{дв}$, создаваемых электродвигателями и передаваемых на исполнительные механизмы с помощью редукторов. В исполнительных устройствах авиационной техники чаще применяют электродвигатели постоянного тока независимого возбуждения с управлением по напряжению якоря [6].

Передаточная функция электродвигателя выражается формулой [6]

$$W(s) = \frac{\omega_{дв}(s)}{u(s)} = \frac{k}{Ts + 1}, \quad (7)$$

где $\omega_{дв}(s)$ – преобразование Лапласа угловой скорости электродвигателя; $u(s)$ – преобразование Лапласа напряжения якоря; $k = 1/k_E$ – коэффициент усиления; $T = R_{я} J / (k_E k_M)$ – электромеханическая постоянная времени; k_E – постоянная противо-ЭДС; k_M – моментная постоянная; $R_{я}$ – омическое сопротивление обмотки якоря; J – момент инерции якоря электродвигателя.

Уравнения динамики электродвигателей постоянного тока рассматриваемой системы сопровождения можно привести к следующему векторному виду:

$$\text{diag}\{J_i\} \frac{d\omega_{дв}}{dt} = \tau_{дв} - \text{diag}\left\{\frac{1}{z_{pi}}\right\} \tau - \tau_{тр}, \quad i=1,2, \quad (8)$$

где $\text{diag}\{J_i\}$ – диагональная матрица моментов инерции якоря; $\omega_{дв} = [\omega_{дв1} \quad \omega_{дв2}]^T$ – вектор угловых скоростей; $\tau_{дв} = [\tau_{дв1} \quad \tau_{дв2}]^T$ – вектор моментов электродвигателей системы; z_{pi} – передаточные числа редукторов; $\tau = [\tau_1 \quad \tau_2]^T$ – вектор обобщенных внешних сил системы, определяемых уравнением (6); $\tau_{тр} = [\tau_{тр1} \quad \tau_{тр2}]^T$ – вектор моментов сил трения.

На практике трение $\tau_{тр}$ рассматривают в виде суммы вязкого $\tau_{трв}$ и сухого $\tau_{трс}$ трений в механических узлах системы. Вязкое трение обусловлено относительной скоростью соприкасающихся поверхностей и может быть выражено формулой [2, 5]:

$$\tau_{трв} = \text{diag}\{k_{vi} z_{pi}\} \frac{dq}{dt}, \quad i=1,2, \quad (9)$$

где k_{vi} – коэффициенты скоростного трения.

Сухое трение зависит от направления вращения ротора электродвигателя и определяется с помощью следующей функции:

$$\tau_{трс} = \text{diag}\{k_{ci}\} \text{sign}\left\{\frac{dq}{dt}\right\}, \quad i=1,2, \quad (10)$$

где k_{ci} – коэффициенты сухого трения, а функция $\text{sign}\{x\}$ определяется знаком x и принимает значения ± 1 .

С учетом того, что вектор угловых скоростей $\omega_{дв}$ связан с вектором обобщенных скоростей dq/dt данной системы зависимостью $\omega_{дв} = \text{diag}\{z_{pi}\} dq/dt$, $i=1,2$, на основе уравнений (6), (8)–(10) после несложных математических преобразований получаем обобщенные уравнения динамики системы с учетом параметров электродвигателей:

$$M^*(q) \frac{d^2 q}{dt^2} + B^*\left(q, \frac{dq}{dt}\right) \frac{dq}{dt} = DU - \text{diag}\{z_{pi} k_{ci}\} \text{sign}\left\{\frac{dq}{dt}\right\}, \quad i=1,2, \quad (11)$$

где $M^*(q) = \text{diag}\{z_{pi}^2 J_i\} + M(q)$;

$$B^*\left(q, \frac{dq}{dt}\right) = \text{diag}\left\{\frac{z_{pi}^2 k_{Ei} k_{Mi}}{R_{\pi i}}\right\} + \text{diag}\{z_{pi}^2 k_{vi}\} + B\left(q, \frac{dq}{dt}\right);$$

$B\left(q, \frac{dq}{dt}\right)$ – известная матрица, определяемая из уравнения (6);

$D = \text{diag} \left\{ \frac{z_{pi} k_{Mi}}{R_{яi}} \right\}$; $U = [u_1 \ u_2]^T$ – вектор напряжений, подаваемых на вход

электродвигателей.

Уравнение (11) описывает динамику системы сопровождения с учетом параметров электродвигателей и механических передач.

На основе полученных выше уравнений математическую модель системы сопровождения можно представить с помощью структурной схемы (рис. 3), где I – единичная матрица размерности 2×2 .

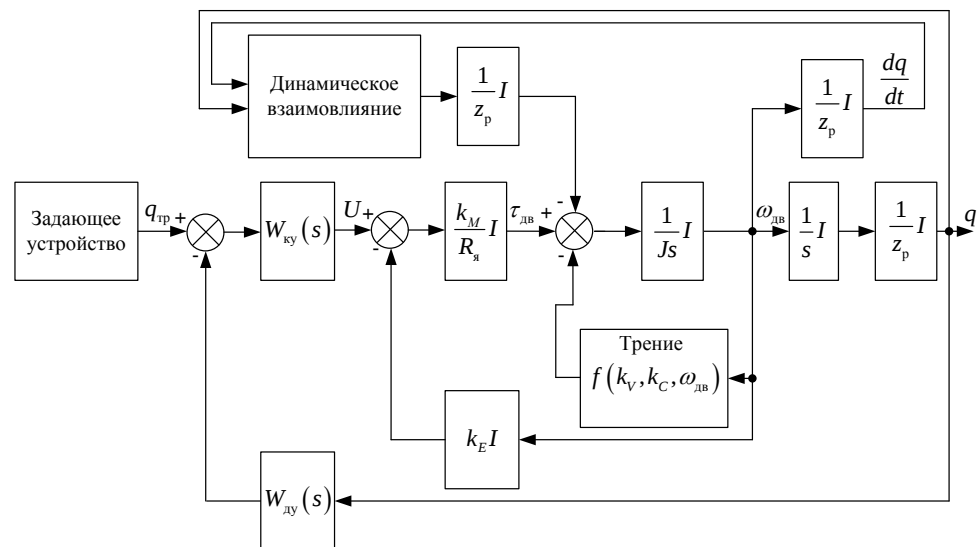


Рис. 3. Структурная схема системы сопровождения

В следующем пункте рассмотрим вопросы влияния моментов сил трения на динамику системы сопровождения в условиях полета ЛА.

3. Неопределенности в модели объекта управления. Обобщенные силы, обусловленные трением в механических исполнительных устройствах, могут быть большими даже для нормальных (наземных) условий и достигать 25% от требуемых усилий передвижения составных частей [2]. Поэтому эти силы имеют существенное влияние на динамику системы в целом.

Коэффициент вязкого трения k_v двигателя является постоянной величиной и задается технической документацией. Информацию о сухом трении в механизмах обычно трудно определить даже в лабораторных условиях, а при энергичном маневре ЛА с большими перегрузками в полете – практически невозможно. С

учетом сказанного возникает неопределенность в динамике системы сопровождения (11).

Для моделирования динамики системы и оценки возможных величин неопределенностей в модели объекта управления рассмотрим причины возникновения сухого трения. Известно, что сухое трение обусловлено реакциями между соприкасающимися поверхностями. Источниками возникновения реакций в виде внутренних усилий в элементах конструкции ЛА служат перегрузки [7], которые в различных частях ЛА, в общем случае, различны (рис. 4).

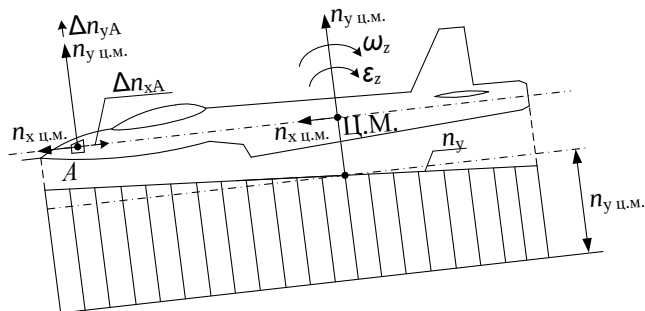


Рис. 4. Распределение перегрузок при маневре ЛА

Для современных ЛА в отдаленных от центра масс точках дополнительная разность перегрузки Δn_{yA} может достигать 1...2 единиц [7].

Для учета влияния перегрузок на силы сухого трения при моделировании динамики системы в качестве их взаимной зависимости в первом приближении принята прямая пропорциональность [7].

4. Моделирование динамики системы сопровождения в среде MATLAB.

Проведем моделирование процесса сопровождения наземной цели в условиях перегрузок и исследуем динамику системы сопровождения в зависимости от величин и предполагаемой доли участия сил сухого и вязкого трений в образовании обобщенных сил системы.

Пусть в полете ЛА сопровождает наземную цель, при этом ее угловые координаты $q_{1т}, q_{2т}^\circ$, поступающие из задающего устройства, зависят от времени следующим образом:

$$\begin{cases} q_{1т}(t) = a \sin(\omega t + \alpha), \\ q_{2т}(t) = b \cos(\omega t + \beta), \end{cases}$$

где $a = 116,48$, $\alpha = 4,93^\circ$, $b = -347,85$, $\beta = -86,71^\circ$, $\omega = \pi/180$, $q_{1т}(0) = 10^\circ$, $q_{2т}(0) = -20^\circ$.

Полет происходит в условиях перегрузок в обоих каналах системы сопровождения со значениями $n_{1,2} = 0, 9$ единиц в каждом канале.

Моделированием в среде MATLAB десятисекундного участка сопровождения наземной цели в условиях перегрузок получены оценки влияния последних на динамическую ошибку следящей системы (рис. 5 и 6).

Как видно из результатов моделирования, при нулевых значениях перегрузок, т.е. при номинальных значениях сил сухого трения, динамическая ошибка сопровождения в обоих каналах с течением времени стремится к некоторому постоянному значению (около $0,01^\circ$). С увеличением перегрузок динамическая ошибка сопровождения возрастает и для перегрузок 9 единиц в обоих каналах достигает значений $1,3^\circ$.

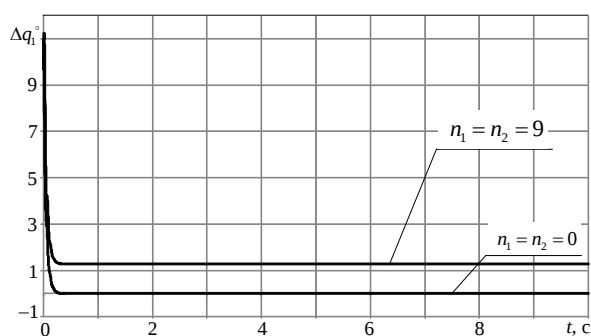


Рис. 5. Влияние перегрузок на динамическую ошибку Δq_1 в канале I

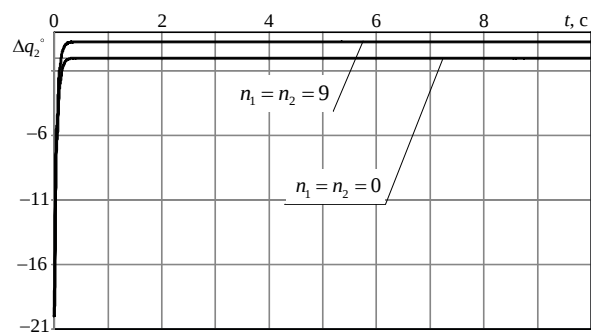


Рис. 6. Влияние перегрузок на динамическую ошибку Δq_2 в канале II

Рост динамической ошибки с увеличением перегрузок в полете ЛА физически закономерен и объясняется увеличением сил сухого трения.

Заключение. В работе рассмотрена зависимость сухого трения механической системы от перегрузок в полете, воздействие которых может непосредственно влиять на динамические ошибки. В условиях полета учет подобной зависимости не всегда возможен. Следовательно, для улучшения динамических характеристик авиационных систем сопровождения с учетом неопределенностей в модели объекта управления следует применять робастный регулятор, синтез которого будет рассмотрен в последующих работах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Методы** классической и современной теории автоматического управления: Учебник в 5-и тт. Т. 1: Математические модели, динамические характеристики и анализ систем автоматического управления / Под ред. **К.А. Пупкова, Н.Д. Егупова**. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 656 с.
2. **Craig J.J.** Introduction to Robotics: Mechanics and Control. – Prentice Hall, 2005. – 408 p.
3. **Paul R.P.** Robot Manipulators: Mathematics, Programming and Control. – The MIT Press, 1981. – 279 p.
4. **Spong M.W., Hutchinson S., Vidyasagar M.** Robot Modeling and Control. – John Wiley and Sons, 2006. – 496 p.
5. **Corke P.** Robotics, Vision and Control. Fundamental Algorithms in MATLAB. – Springer, 2011. – 570 p.
6. **Казаков И.Е., Исаев В.Н.** Основы автоматических систем авиационного вооружения. – М.: Издательство ВВИА им. Н.Е. Жуковского, 1991. – 332 с.
7. **Конструкция** и прочность летательных аппаратов / Под ред. **О.В. Болховитинова**. – М.: Издательство ВВИА им. Н.Е. Жуковского, 2004. – 678 с.

ГИУА (ПОЛИТЕХНИК). Материал поступил в редакцию 10.09.2013.

Ա.Հ. ԲԱԴԻՅԱՆ

ԹՈՂՈՂ ՍԱՐՔԵՐԻՑ ՎԵՐԳԵՏՆՅԱ ՕԲՅԵԿՏՆԵՐԻ ՈՒՂԵԿՑՄԱՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳԵՐԻ ՊԻՆԱՄԻԿԱՅԻ ԱՆՈՐՈՇՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՄԱՍԻՆ

Դիտարկված է թռչող սարքերից վերգետնյա օբյեկտների ուղեկցման համակարգերի դինամիկան: Համակարգերի դինամիկայում մատնանշվել են կառավարման որակի վրա ազդող անորոշություններ: Իրականացվել է այդ անորոշությունների ազդեցության գնահատումը համակարգի դինամիկայի վրա:

Առանցքային բառեր. թռչող սարք, ուղեկցում, համակարգի դինամիկա, համակարգի մոդելի անորոշություններ:

A.H. BAGHIYAN

ON THE UNCERTAINTIES IN DYNAMICS OF THE GROUND TARGET TRACKING SYSTEMS FROM AIRCRAFT

The dynamics of the system of ground target tracking from an aircraft is considered. Uncertainties in the dynamics of tracking systems are revealed, influencing the quality of realization of automatic control. Evaluation of the impact of uncertainties on the dynamics of the systems is carried out.

Keywords: aerial vehicle, tracking, dynamics of the system, uncertainties in the model of the system.

ԲՈՎԱՆԴԱԿՈՒԹՅՈՒՆ

ՍԱՐԳՍՅԱՆ ՅՈՒ.Լ., ՍՏԵՓԱՆՅԱՆ Կ.Գ., ՎԵՐԼԻՆՍԿԻ Ս.Վ. ՍԱՀՄԱՆԱՓԱԿ ՇԱՐԺՈՒՆՈՒԹՅԱՄԲ ՎԵՐԱԿՈՆՖԻԳՈՒՐԱՅՎՈՂ ՋՈՒԳԱՀԵՌ ՄԱՆԻՊՈՒԼՅԱՏՈՐՆԵՐԻ ԱՊՐՈՔՍԻՄԱՅԻՈՆ ՍԻՆԹԵԶ ԸՍՏ ՃՇԳՐՏՈՒԹՅԱՆ ՄԻՆԻՄԱՔՍՍՅՈՒՆ ՉԱՓԱՆԻՇԻ	119
ԱՂԲԱԼՅԱՆ Ս.Գ., ՍԱՖԱՐՅԱՆ Տ.Ն., ԱՆԴՐԻԱՍՅԱՆ Ա.Վ., ՎԱՐԴԱՆՅԱՆ Վ.Գ. ԱԼՅՈՒՄԻՆԱՅԻՆ ՀՐԱՍՈՒՐ ՓՈՇԵՀԱՄԱՁՈՒԼ ՎԱԾՔՆԵՐԻ ԿԱՌՈՒՑՎԱԾՔԱԳՈՅԱՅՄԱՆ ԳՈՐԾԸՆԹԱՅԻ ՀԵՏԱՋՈՏՈՒՄԸ ԵՎ ՄԵՏԱՂԱԳՐԱԿԱՆ ՎԵՐԼՈՒԾՈՒԹՅՈՒՆԸ	128
ՍԱՐԳՍՅԱՆ Լ.Ե., ՀՈՎՀԱՆՆԻՍՅԱՆ Ա.Մ., ՎԱՐԴԱՆՅԱՆ Դ.Գ. ՊՂՆՁԻ ԿՈՐՋՈՒՄԸ ՊՂԻՆՁ-ՑԻՆԿ-ԿԱՊԱՐԱՅԻՆ ՍՈՒԼՖԱՏԱՅՎԱԾ ԲՈՎՎԱԾՔԻ ՏԱՐՐԱԼՈՒԾՄԱՆ ԼՈՒԾՈՒՅԹԻՑ	138
ՍԱՐՏԻՐՈՍՅԱՆ Վ.Հ., ՍԱՐԳՍՅԱՆ Ք.Վ., ՍԱՍՈՒՆՅԱՆ Ս.Է., ԼԻՍՈՎՍԿԱՅԱ ՅՈՒ.Օ. ՋԵՐՄԱՍՇԱԿՈՒՄԸ ԴՐՄԲՈՆԻ ՈՍԿԻ - ՊՂՆՁԱՅԻՆ ՍՈՒԼՖԻԴԱՅԻՆ ԽՏԱՆՅՈՒԹԻ ԾՕՄԲԱԹՎԱՅԻՆ ՏԱՐՐԱԼՈՒԾՄԱՆ ԳՈՐԾԸՆԹԱՅՈՒՄ	144
ՍԻՐԱԴԵՂՅԱՆ Ս.Ա., ԿԻՐԱԿՈՍՅԱՆ Ռ.Գ. ՄԱՍՆԱԳԻՏԱՅՎԱԾ ՔՈՄԹՅՈՒԹԵՐԱՅԻՆ ՑԱՆՅԵՐԻ ԿԱՌՈՒՑՎԱԾՔԻ ՆԱԽԱԳԾՄԱՆ ԱՎՏՈՄԱՏԱՅՎԱԾ ԳՈՐԾԻՔԱՅԻՆ ՄԻՋՈՑԻ ՄՇԱԿՈՒՄԸ	155
ՄԵԼԻՔՅԱՆ Վ.Շ., ԴԻՆԳՉՅԱՆ Հ.Հ., ՍԱՀԱԿՅԱՆ Ա.Ս., ՀԱՅՐԱՊԵՏՅԱՆ Ա.Հ., ԲԱԲԱՅԱՆ Վ.Ս., ՍԱՐՏԻՐՈՍՅԱՆ Ա.Ս. ՑԱԾՐԱՎՈԼՏ ԵՎ ԵԼՔԱՅԻՆ ԼԱՐՄԱՆ ՄԵԾ ԱՇԽԱՏԱՆՔԱՅԻՆ ՏԻՐՈՒՅԹՈՎ ՀՈՍԱՆՔԻ ՀԱՅԵԼԻ	165
ՍԱՐԿՈՍՅԱՆ Ս.Վ., ԱՎԵՏԻՍՅԱՆ Վ.Հ., ՀՈՎՀԱՆՆԻՍՅԱՆ Ա.Ա., ԱՀԱՐՈՆՅԱՆ Ա.Կ., ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ Ա.Ի., ՍՈՒՂՅԱՆ Գ.Զ. ՄԵՏՐԱՅԻՆ ԱԼԻՔՆԵՐԻ ՏԻՐՈՒՅԹԻ ՌԱԴԻՈԼՈԿԱՅԻՈՆ ԿԱՅԱՆԻ ԱՆՏԵՆԱՅԻՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳԻ ԱՐԴԻԱԿԱՆԱՅՈՒՄ	173
ԳԵՎՈՐԳՅԱՆ Ա.Ա., ԲԱՂՂԱՍԱՐՅԱՆ Ա.Ս., ՖԱՏՅԱՆ Ռ.Է. ԵՌԱԶՈՓ ԻՆՏԵԳՐԱԼ ՄԽԵՄԱՆԵՐՈՒՄ ՋԵՐՄՈՒԹՅԱՆ ՆՎԱՋԵՑՄԱՆՆ ՈՒՂՂՎԱԾ ՀԱՃԱԽՈՒԹՅԱՆ ԴԻՆԱՄԻԿ ՄԱՇՏԱԲԱՎՈՐՈՒՄ	183
ՍԼՈՅԱՆ Կ.Պ. ԹՎԱՅԻՆ ԻՆՏԵԳՐԱԼ ՄԽԵՄԱՆԵՐԻ ՎԻՃԱԿԱԳՐԱԿԱՆ ՎԱՐՔԸ ՎԵՐԱՐՏԱԴՐՈՂ ԵՂԱՆԱԿ	193
ՆԱՂՇՊՈՒՐ Ս. Շ. ՇՏԱՊ ՕԳՆՈՒԹՅԱՆ ԷԼԵԿՏՐՈՆԱՅՎԱԾ ՄԵՔԵՆԱՆԵՐԻՑ ՏՎՅԱԼՆԵՐԻ ՀԱՂՈՐԴՄԱՆ ԿԱՌԱՎԱՐՄԱՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳԻ ՆԱԽԱԳԾՈՒՄ ԵՎ ՄՈՂԵԼԱՎՈՐՈՒՄ	203
ԹԵՐՋՅԱՆ Հ.Ա., ՍՈՒՔԻԱՍՅԱՆ Հ.Ս., ՀԱԿՈՔՅԱՆ Ա.Է., ԳԵՎՈՐԳՅԱՆ Ա.Ա. ԵՂԻԱՋԱՐՅԱՆ Ն.Ա. ՄԱԳՆԻՍԱԿԱՆ ԴԱՇՏԻ ԵՌԱԶՈՓ ՎԵՐՋԱՎՈՐ ՏԱՐՐԱՅԻՆ ՄՈՂԵԼԱՎՈՐՄԱՄԲ ՄԱԳՆԻՍԱԿԱՆ ՊՈՏԵՆՑԻԱԼԻ ՄԵԹՈԴՆԵՐԻ ՎԵԿՏՈՐԻ ՀԱՇՎԱՐԱԿԻ ՀԱՄԵՄԱՏԱԿԱՆ ՎԵՐԼՈՒԾՈՒԹՅՈՒՆ	213

ՄԻՄՈՆՑԱՆ Ս.Հ., ԱՍԼԱՆՑԱՆ Հ.Ա.	
ՊԱՐԱՄԵՏՐԱԿԱՆ (B, Q) ՏԵՍԱԿԻ ԸՆԴՀԱՆՐԱՑՎԱԾ ՀԱԿԱԴԱՐՁ ՄԱՏՐԻՑՆԵՐԻ ՈՐՈՇՄԱՆ ՄԵԹՈԴ	220
ԳԱՄՊԱՐՑԱՆ Օ.Ն., ԱՐԱԲՅԱՆ Ս.Գ.	
ԱՐՀԵՍՏԱԿԱՆ ՁԵՌՔԻ L_1 ԱԴԱՊՏԻՎ ԿԱՌԱՎԱՐՄԱՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳԻ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԸ ՀԱԿԱԴԱՐՁ ԴԻՆԱՄԻԿԱՅԻ ՄԵԹՈԴԻ ԿԻՐԱՌՄԱՄԲ	227
ԱՎԵՏԻՍՅԱՆ Ա.Գ., ԳՅՈՒԼՁԱՂՅԱՆ Լ.Ս.	
ԲԱԶՄԱՊԱՐԱՄԵՏՐԱԿԱՆ ԳԾԱՅԻՆ ԾՐԱԳՐԱՎՈՐՄԱՆ ԽՆԴԻՐՆԵԻ ԼՈՒԾՄԱՆ ՄԵԹՈԴ՝ ՀԻՄՆՎԱԾ ԴԻՖԵՐԵՆՑԻԱԼ ՁԵՎԱՓՈԽՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՎՐԱ	235
ԲԱՂԻՑԱՆ Ա.Հ.	
ԹՈՉՈՂ ՍԱՐՔԵՐԻՑ ՎԵՐԳԵՏՆՅԱ ՕԲՅԵԿՏՆԵՐԻ ՈՒՂԵԿՄԱՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳԵՐԻ ԴԻՆԱՄԻԿԱՅԻ ԱՆՈՐՈՇՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՄԱՍԻՆ	244

СОДЕРЖАНИЕ

САРКИСЯН Ю.Л., СТЕПАНЯН К.Г., ВЕРЛИНСКИЙ С.В. АППРОКСИМАЦИОННЫЙ СИНТЕЗ РЕКОНФИГУРИРУЕМЫХ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ МАНИПУЛЯТОРОВ С ОГРАНИЧЕННОЙ ПОДВИЖНОСТЬЮ ПО МИНИМАКСНОМУ КРИТЕРИЮ ТОЧНОСТИ	119
АГБАЛАН С.Г., САФАРЯН Т.Н., АНДРИАСЯН А.В., ВАРДАНЯН В.Г. ИССЛЕДОВАНИЕ И МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ ЖАРОПРОЧНЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ ПОРОШКОВЫХ СПЛАВОВ	128
САРГСЯН Л.Е., ОГАНЕСЯН А.М., ВАРДАНЯН Д.Г. ИЗВЛЕЧЕНИЕ МЕДИ ИЗ РАСТВОРА ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ МЕДЬ-ЦИНК-СВИНЦОВОГО СУЛЬФАТИЗИРОВАННОГО ОГАРКА	138
МАРТИРОСЯН В.А., САРКИСЯН К.В., САСУНЦЯН М.Э., ЛИСОВСКАЯ Ю.О. ТЕРМООБРАБОТКА ДРМБОНСКОГО ЗОЛОТО-МЕДНОГО СУЛЬФИДНОГО КОНЦЕНТРАТА ПРИ СЕРНОКИСЛОТНОМ ВЫЩЕЛАЧИВАНИИ	144
СИРАДЕГЯН С.А., КИРАКОСЯН Р.Г. РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО СРЕДСТВА ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ КОМПЬЮТЕРНЫХ СЕТЕЙ	155
МЕЛИКЯН В.Ш., ДИНГЧЯН А.Г., СААКЯН А.С., АЙРАПЕТЯН А.Г., БАБАЯН В.С., МАРТИРОСЯН А.С. НИЗКОВОЛЬТНОЕ ТОКОВОЕ ЗЕРКАЛО С БОЛЬШИМ ВЫХОДНЫМ ДИАПАЗОНОМ НАПРЯЖЕНИЯ	165
МАРКОСЯН М.В., АВЕТИСЯН В.Г., ОГАНЕСЯН А.А., АГАРОНЯН А.К., ПЕТРОСЯН А.И., СУГЯН Г.З. МОДЕРНИЗАЦИЯ АНТЕННОЙ СИСТЕМЫ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СТАНЦИИ ДИАПАЗОНА МЕТРОВЫХ ВОЛН	173
ГЕВОРКЯН А.А., БАГДАСАРЯН А.М., ФАТЯН Р.Э. ДИНАМИЧЕСКОЕ МАСШТАБИРОВАНИЕ ЧАСТОТЫ ДЛЯ МИНИМИЗАЦИИ ТЕМПЕРАТУРЫ В ТРЕХМЕРНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМАХ	183
СЛОЯН К.П. СПОСОБ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ СТАТИСТИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ ЦИФРОВЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ	193
НАХИШПУР С.Ш. ПРОЕКТИРОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПЕРЕДАЧЕЙ ДАННЫХ ИЗ ЭЛЕКТРОНИФИЦИРОВАННЫХ МАШИН СКОРОЙ ПОМОЩИ	203
ТЕРЗЯН А.А., СУКИАСЯН Г.С., АКОПЯН А.Э., ГЕВОРГЯН А.А., ЕГИАЗАРЯН Н.А. СОПОСТАВИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ВЕКТОРА МАГНИТНОГО ПОТЕНЦИАЛА ПРИ ТРЕХМЕРНОМ КОНЕЧНОЭЛЕМЕНТНОМ МОДЕЛИРОВАНИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ	213
СИМОНЯН С.О., АСЛАНЯН Г.А. МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ (В, Q)-ОБОБЩЕННО-ОБРАТНЫХ МАТРИЦ	220
ГАСПАРЯН О.Н., АРАБЯН С.Г. ИССЛЕДОВАНИЕ L_1 АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ИСКУССТВЕННОЙ РУКОЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА ОБРАТНОЙ ДИНАМИКИ	227
АВЕТИСЯН А.Г., ГЮЛЬЗАДЯН Л.С. МЕТОД РЕШЕНИЯ МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ЗАДАЧ ЛП, ОСНОВАННЫЙ НА ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЯХ	235
БАГИАН А.А. О НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЯХ В ДИНАМИКЕ СИСТЕМ СОПРОВОЖДЕНИЯ НАЗЕМНЫХ ОБЪЕКТОВ С ЛЕТАТЕЛЬНЫМИ АППАРАТАМИ	244

CONTENTS

SARKISSYAN Y.L., STEPANYAN K.G., VERLINSKI S.V.	
APPROXIMATE SYNTHESIS OF LIMITED MOBILITY RECONFIGURABLE PARALLEL MANIPULATORS WITH A MINIMAX ACCURACY CRITERION.....	119
AGHBALYAN S.G., SAFARYAN T.N., ANDRIASYAN A.V., VARDANYAN V.G.	
INVESTIGATION AND METALLOGRAPHIC ANALYSIS OF THE STRUCTURE FORMATION PROCESS OF HEAT-RESISTANT ALUMINIUM POWDER ALLOYS	128
SARGSYAN L.Ye., HOVHANNISYAN A.M., VARDANYAN D.G.	
EXTRACTION OF COPPER FROM THE LEACHING SOLUTION OF COPPER-ZINC-LEAD SULPHATIZED ROAST-CALCINE	138
MARTIROSYAN V.H., SARGSYAN K.V., SASUNTSYAN M.E., LISOVSKAYA YU.O.	
HEAT TREATMENT OF THE DRMBON GOLD-COPPER SULPHIDIC CONCENTRATE AT SULPHURIC ASID LEACHING	144
SIRADEGHYAN S.A., KIRAKOSSIAN R.G.	
DEVELOPING AUTOMATED TOOLS FOR DESIGNING A STRUCTURE FOR SPECIALIZED COMPUTER NETWORKS	155
MELIKYAN V.SH., DINGCHYAN H.H., SAHAKYAN A.S., HAYRAPETYAN A.G., BABAYAN V.S., MARTIROSYAN A.S.	
A LOW VOLTAGE CURRENT MIRROR WITH A HIGH OUTPUT VOLTAGE SWING	165
MARKOSYAN M.V., AVETISYAN V.H., HOVHANNISYAN A.A., AHARONYAN A.K., PETROSYAN A.I., SUGYAN G.Z.	
MODERNIZING THE ANTENNA SYSTEM OF A METER WAVEBAND RADAR UNIT	173
GEVORGYAN A.A., BAGHDASARYAN A.M., FATYAN R.E.	
THERMAL AWARE DYNAMIC FREQUENCY SCALING FOR 3D IC	183
SLOYAN K.P.	
A METHOD FOR REPRODUCING THE STATISTICAL BEHAVIOR OF DIGITAL INTEGRATED CIRCUITS.....	193
SOHRAB. SH. NAGHSHPOOR	
DESIGN AND MODELING OF AN INFORMATION TRANSFER SYSTEM FOR MANAGING OF ELECTRONIZED EMERGENCY VEHICLES (EEV)	203
TERZYAN H.A., SUKIASYAN H.S., HAKOBYAN A.E., GEVORGYAN A.A., YEGHIAZARYAN N.A.	
A COMPARATIVE ANALYSIS OF THE CALCULATION METHODS FOR THE MAGNETIC POTENTIAL VECTOR AT THREE DIMENSIONAL FINITE ELEMENT SIMULATION OF THE MAGNETIC FIELD.....	213
SIMONYAN S.H., ASLANYAN H.A.	
A METHOD FOR DETERMINING (B, Q)- TYPES OF PARAMETRIC GENERALIZED INVERSE MATRICES.....	220
GASPARYAN O.N., ARABYAN S.G.	
INVESTIGATING THE L_1 ADAPTIVE CONTROL SYSTEM OF AN ARTIFICIAL ARM BY USING THE METHOD OF INVERSE DYNAMICS	227
AVETISYAN A.G., GYULZADYAN L.S.	
A METHOD FOR SOLVING MULTIPARAMETRIC LINEAR PROGRAMMING PROBLEMS BASED ON G. E. PUKHOV'S DIFFERENTIAL TRANSFORMS.....	235
BAGHIYAN A.H.	
ON THE UNCERTAINTIES IN DYNAMICS OF THE GROUND TARGET TRACKING SYSTEMS FROM AIRCRAFT	244