

ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԱԶԳԱՅԻՆ ԱԿԱԴԵՄԻԱՅԻ ԵՎ

ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԱԶԳԱՅԻՆ ՊՈԼԻՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆԻ

ՏԵԴԵԿՆԱԳԻՐ

ИЗВЕСТИЯ

НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК АРМЕНИИ И

НАЦИОНАЛЬНОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
АРМЕНИИ

ՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՍԵՐԻԱ

СЕРИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК

ԵՐԵՎԱՆ

ЕРЕВАН

Журнал издается с 5.01.1948 г.

Выходит 4 раза в год

ԽՄԲԱԳՐԱԿԱՆ ԿՈԼԵԳԻԱ

Ռ.Ս. ՄԱՐՏԻՐՈՍՅԱՆ (գլխավոր խմբագիր), Հ.Ա. ԹԵՐԶՅԱՆ (գլխ. խմբ. տեղակալ), Զ.Կ. ՍՏԵՓԱՆՅԱՆ (պատասխանատու քարտուղար), Ս.Գ. ԱՂԲԱԼՅԱՆ, Ռ.Վ. ԱԹՈՅԱՆ, Վ.Վ. ԲՈՒՆԻԱՏՅԱՆ, Ժ.Դ. ԴԱՎԻԴՅԱՆ, Ս.Պ. ԴԱՎԹՅԱՆ, Ս.Ս. ՂԱԶԱՐՅԱՆ, Ռ.Զ. ՄԱՐՈՒԽՅԱՆ, ՅՈՒ.Լ. ՍԱՐԳՍՅԱՆ, Վ.Ս. ՍԱՐԳՍՅԱՆ, Ս.Հ. ՄԻՄՈՆՅԱՆ, Ս.Գ. ՍՏԱԿՅԱՆ, Վ.Ս. ԽԱԶԱՏՐՅԱՆ

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Ր.Մ. ՄԱՐՏԻՐՈՍՅԱՆ (главный редактор), Ա.Ա. ԹԵՐԶՅԱՆ (зам. глав. редактора),
Յ.Կ. ՍՏԵՓԱՆՅԱՆ (ответственный секретарь), Ս.Գ. ԱԳԲԱԼՅԱՆ,
Ր.Վ. ԱԹՅԱՆ, Վ.Վ. ԲՈՒՆԻԱՏՅԱՆ, Ժ.Դ. ԴԱՎԻԴՅԱՆ, Ս.Պ. ԴԱՎՏՅԱՆ, Ս.Մ. ԿԱԶԱՐՅԱՆ,
Վ.Յ. ՄԱՐՈՒԽՅԱՆ, ՅՈՒ.Լ. ՍԱՐԿԻՍՅԱՆ, Վ.Ս. ՍԱՐԿԻՍՅԱՆ,
Ս.Օ. ՍԻՄՈՆՅԱՆ, Մ.Գ. ՏԱԿՅԱՆ, Վ.Ս. ԽԱՇԱՏՐՅԱՆ

EDITORIAL BOARD

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

Հրատ. խմբագիր՝

ԺԱՆՆԱ ՍԵՅՐԱՆՅԱՆ

Համակարգչային շարվածքը
և ձևավորումը

ԼԻԼԹ ՄԱՐՏԻՐՈՍՅԱՆԻ

Խմբագիրներ՝

ԼԵՅԼԱ ՍՏԵՓԱՆՅԱՆ
ՆԵԼԼԻ ԱՆԱՆՅԱՆ

© Издательство ГИУА

Известия НАН и ГИУ Армении (сер. техн. наук), 2008

Ю.Л. САРКИСЯН, Т.Ф. ПАРИКЯН, К.Г. СТЕПАНЯН, А.Г. ХАРАТЯН

АППРОКСИМАЦИОННЫЙ СИНТЕЗ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ МАНИПУЛЯТОРОВ ПО НЕПОЛНОСТЬЮ ОПРЕДЕЛЕННЫМ ПОЛОЖЕНИЯМ ВЫХОДНОГО ЗВЕНА

Рассматривается задача приближенного воспроизведения множества неполностью определенных положений объекта в пространстве. Приводятся два упрощенных подхода к решению рассматриваемой задачи – ее сведение к случаю воспроизведения полностью определенных положений объекта и представление в виде аппроксимационной задачи со связанными переменными. Разработаны алгоритмы и программы аппроксимационного синтеза и кинематического анализа параллельных манипуляторов. Приведен численный пример.

Ключевые слова: параллельные манипуляторы, аппроксимационный синтез, неполностью определенные положения, связанные переменные.

Введение. В [1,2] представлены теория и методы аппроксимационного синтеза пространственных параллельных механизмов, приближенно реализующих программу движения твердотельного объекта по отношению к неподвижной системе отсчета. Программа движения, подлежащая реализации, может быть задана либо непрерывно–аналитическими зависимостями обобщенных координат объекта от обобщенных координат проектируемого механизма, либо дискретной последовательностью конечноудаленных положений объекта. В [3,4] развит алгоритмический аппарат аппроксимационного синтеза параллельных механизмов, который основан на особенностях функций отклонения соответствующих аппроксимационных задач и эффективно применен при проектировании оборудования для обработки криволинейных поверхностей и сварки пространственных швов [5], систем ориентации оптической оси и юстировки антенн [2] и других устройств.

В цитируемых работах использован блочно-модульный принцип структурно–параметрического синтеза пространственных манипуляционных механизмов, разбивающий процесс синтеза на совокупность процедур синтеза подцепей проектируемого механизма, соединяющих объект с системой отсчета, с наложением определенного числа связей на его движение. Однако такая декомпозиция возможна лишь в том случае, когда заданы все 6 обобщенных координат манипулируемого объекта, т.е. его движение определено полностью. На практике же часто возникает необходимость воспроизведения неполностью определенных положений объекта, когда задача сводится к реализации отдельных элементов тела – прямой, точки, плоскости или их комбинаций.

В настоящей статье рассматривается задача приближенного воспроизведения множества неполностью определенных положений объекта в пространстве. Решение задачи в общей постановке чрезвычайно сложно ввиду существенной нелинейности зависимостей,

связывающих неопределенные координаты объекта с его заданными обобщенными координатами. Представлены два упрощенных подхода к решению рассматриваемой задачи – ее сведение к случаю воспроизведения полностью определенных положений объекта и представление в виде аппроксимационной задачи со связанными переменными .

Аппроксимационный синтез с “доопределением” положений объекта. Первый подход проиллюстрируем на примере семизвенника 5(CC) (рис.1).

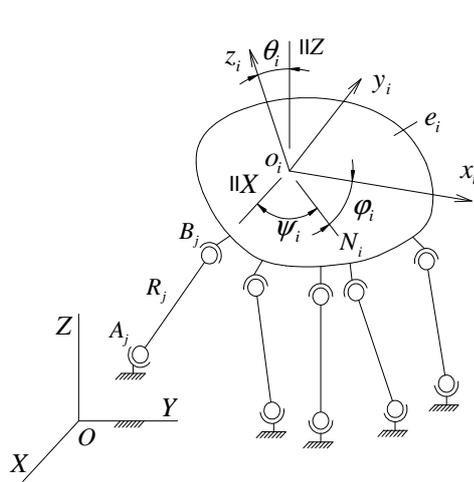


Рис. 1. Семизвенник типа 5(CC)

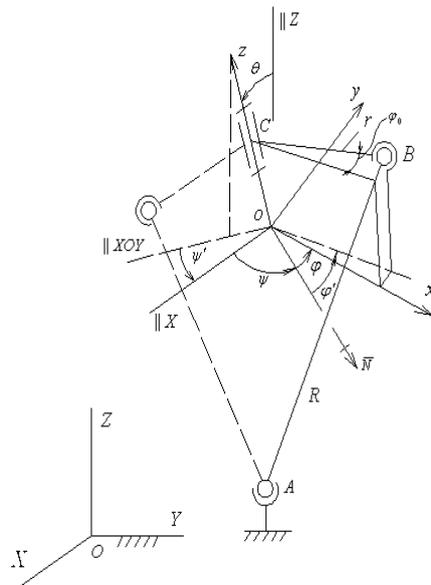


Рис. 2. Группа Ассур типа BCC

Пусть заданы обобщенные координаты X_{o_i} , Y_{o_i} , Z_{o_i} , ψ_i , θ_i тела e в его конечноудаленных положениях e_i ($i = 1, 2, \dots, N$) относительно неподвижной системы отсчета OXYZ, а шестая обобщенная координата φ не определена. Заданные наборы значений обобщенных координат определяют N положений оси $o_i z$ подвижной системы координат $o_i x y z$, неразрывно связанной с e . Требуется спроектировать одноподвижный семизвенник 5(CC), приближенно воспроизводящий заданные положения прямой $o_i z$ тела e .

Чтобы решить рассматриваемую задачу блочно-модульным итерационным методом, предложенным в [1], следует ликвидировать неопределенность положений e_i предварительным выбором начального приближения φ_i^0 ($i = 1, 2, \dots, N$) и дальнейшим варьированием значений φ_i в определенном интервале. Здесь можно поступить двояко: либо произвольно назначить значения углов φ_i^0 , либо их определить заданием параметров одного из

бинарных звеньев СС, что позволяет вычислить значения углов φ_i^o . Как видно из рис.2, эта задача сводится к определению сборок группы Ассура типа ВСС при фиксированном положении оси O_iZ и, следовательно, к определению точек пересечения окружности, очерченной при вращении точки B_j вокруг оси O_iZ , и сферы радиуса AB_i с центром в A . Таким образом, получаем N полностью определенных положений e_i тела e , после чего остальные 4 подцепы СС семизвенника синтезируются с помощью известных быстросходящих итерационных процедур вычисления квадратического приближения, основанных на последовательном обращении движения тел e и E [3,4]. После определения геометрических параметров 4-х неизвестных бинарных звеньев, соответствующих точкам локального минимума среднеквадратической суммы функции отклонения (взвешенной разности) [1], процесс синтеза заканчивается, если сумма нормальных отклонений точек B_j ($j=1,2,3,4,5$) от приближающих сфер радиусов R_j с центрами в A_j меньше наперед заданной допустимой величины ε :

$$S_{\Sigma} = \sum_{j=1}^5 \max_{i \in [1:N]} |R_j - |A_j B_{ji}|| < \varepsilon.$$

В противном случае, возвращаемся к определению нового набора углов φ_i ($i = 1,2,\dots, N$) численной аппроксимацией градиентов функции $S_{\Sigma}(\varphi_1, \dots, \varphi_N)$ [1]. Указанный процесс повторяется до тех пор, пока не удовлетворяется вышеуказанное неравенство или же пока разность между значениями $S_{\Sigma}^{(k)}$ и $S_{\Sigma}^{(k-1)}$ для двух последующих шагов процесса не станет меньше некоторой заранее заданной константы. Вместо значений φ_i можно варьировать параметрами $x_B, y_B, z_B, x_A, y_A, z_A, R$, доопределяющими положения звена AB , а углы φ_i вычислить определением положений группы Ассура (рис. 2).

Следующим этапом синтеза является определение истинных положений тела e , воспроизводимых спроектированным механизмом 5(СС), путем его анализа, когда задается одна из обобщенных координат, скажем φ , и вычисляются значения остальных пяти, определив положение начала O' и оси $O'Z'$ подвижной системы координат. После этого нетрудно вычислить расхождение между требуемыми и воспроизводимыми положениями линии OZ тела e , а именно: расстояние между началами координат O и O' , а также угол между OZ и $O'Z'$.

На основе вышеуказанного алгоритма составлены программа синтеза механизма 5(СС) и программа его последующего кинематического анализа для определения реальных положений тела e в составе механизма 5(СС), а также отклонения от исходных положений.

Пример. Спроектировать механизм 5(СС) по 10-ти неполностью определенным положениям тела e , заданным в 5 столбцах табл.1. В шестом столбце приведены начальные значения углов φ_i .

Таблица 1

N	X_{o_i}	Y_{o_i}	Z_{o_i}	ψ_i^o	θ_i^o	φ_i^o
1	5,002	4,005	2,998	6,709	48,771	109,357
2	4,941	3,950	3,161	6,129	51,907	107,786
3	4,737	3,746	3,678	7,621	60,315	103,811
4	4,457	3,555	4,181	11,045	71,083	101,072
5	4,175	3,486	4,517	14,656	80,383	100,432
6	3,854	3,497	4,786	18,317	88,596	100,600
7	3,628	3,570	4,907	19,573	92,861	99,771
8	3,324	4,006	4,784	14,138	93,633	91,446
9	3,070	4,522	4,485	8,398	90,039	83,861
10	2,840	5,011	4,100	4,257	85,597	78,948

Значения геометрических параметров звеньев сведены в табл.2, а соответствующие им углы – в табл.3.

Таблица 2

j	X_{A_j}	Y_{A_j}	Z_{A_j}	X_{B_j}	Y_{B_j}	Z_{B_j}	l_j	$\max \Delta l_j $
1	0,0719	0,1017	0,0870	0,0360	-0,0041	0,0017	6,9443	0,0010
2	-0,0577	1,0088	6,0376	5,6409	-0,0029	3,0300	5,8457	0,0005
3	8,0163	-5,0071	-1,0001	6,0916	-1,7899	-2,658	17,1448	0,0016
4	6,0091	1,0059	3,9998	11,8596	4,4247	0,8208	14,2324	0,0008
5	4,9661	6,0074	6,9915	8,9407	-14,607	-2,036	14,2527	0,0006

Таблица 3

φ_1^o	109,31628	φ_6^o	100,55560
φ_2^o	107,71351	φ_7^o	99,75441
φ_3^o	103,72216	φ_8^o	91,45164
φ_4^o	100,98456	φ_9^o	83,87869
φ_5^o	100,36138	φ_{10}^o	78,96665

Реальные положения тела e в составе механизма 5(СС) и отклонения от исходных положений представлены в табл.4.

Таблица 4

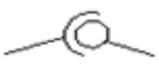
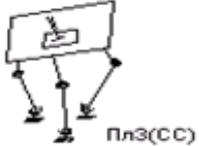
i	X_{o_i}	Y_{o_i}	Z_{o_i}	$ \overline{oo'} $	$\cos(\overline{OZ} \wedge \overline{O'Z'})$
1	5,00192	4,00319	2,99812	0,00182	0,99999
2	4,94099	3,95164	3,16127	0,00167	0,99999
3	4,73656	3,74450	3,68020	0,00270	0,99999
4	4,45688	3,55451	4,18139	0,00063	0,99999
5	4,17501	3,48542	4,51670	0,00065	0,99999
6	3,85521	3,49785	4,78396	0,00252	0,99999
7	3,62933	3,57108	4,90523	0,00246	0,99999
8	3,32300	4,00503	4,78555	0,00208	0,99999
9	3,07022	4,52121	4,48532	0,00088	0,99999
10	2,83974	5,01125	4,09979	0,00042	0,99999

Описанная методика синтеза позволяет синтезировать одноподвижный (одноприводный) манипулятор, переводящий ось \overline{OZ} рабочего органа e через заданные в пространстве положения с требуемой точностью приближения. Поворот e вокруг оси \overline{OZ} можно осуществить автономным приводом, установленным на e . Подобный манипулятор предложен в [6]. В [5] описаны также технологические приложения данного механизма в качестве приспособлений для обработки криволинейных поверхностей и сварки пространственных швов. Предложены 4 варианта реализации механизмов 4(СС) и 5(СС) с одним и двумя приводами, установленными на неподвижном звене. Предложенные механизмы спроектированы с использованием описанной методики синтеза.

Типы неопределенностей положений тела e и соответствующие геометрические образы. Выше был рассмотрен случай неопределенности, когда заданы положения линейного элемента (оси \overline{OZ}) тела e , т.е. его положения определены с точностью до поворота вокруг некоторой оси. Соответствующий геометрический образ известен как “точка на ориентированной прямой” или “направленный отрезок”, “точка на ориентированной плоскости”. В практике проектирования манипуляционных механизмов возникают задачи воспроизведения положений иных геометрических образов: точки, ориентированной прямой, ориентированной плоскости, ориентированной прямой в ориентированной плоскости. Каждому из этих геометрических образов по аналогии со случаем, рассмотренным выше, можно сопоставить определенную кинематическую пару, соединяющую тело со стойкой (табл. 5), что позволяет свести задачу до определения положений тела e к определению сборок соответствующих групп Ассур, представленных в таблице. После доопределения положений тела e задача синтеза решается так же, как и в рассмотренном случае. Возможности предлагаемого метода синтеза не исчерпываются одноподвижными механизмами. Исходя из специфики конкретной задачи манипулирования, можно спроектировать и двух-, трех- и даже четырехподвижные манипуляционные механизмы, причем вместо бинарного звена СС в качестве присоединимых к

телу e подцепей могут быть применены и другие бинарные звенья или же более сложные подцепи.

Таблица 5

Геометрический образ	Эквивалентная кинематическая пара	Число неопределенных координат	Соответствующая группа Ассур
 точка	 С	3	 СЗ(СС)
 ориентированная плоскость	 Пл	3	 ПлЗ(СС)
 ориентированная прямая	 Ц	2	 ЦЗ(СС)
 точка на ориентированной прямой	 В	1	 ВСС
 ориентированная прямая на ориентированной плоскости	 П	1	 ПСС

Точное воспроизведение положений тела e . Представляет определенный теоретический и практический интерес задача точного воспроизведения неположенности определенных положений лишь некоторых элементов тела. Аналогом этой задачи в случае полностью определенных положений тела e является известная задача Бурместера–Шенфлиса, положившая начало классической теории точных положений (кинематической геометрии конечноудаленных положений) твердого тела [1].

Попробуем теперь установить максимальное число положений объекта e , которые могут быть точно воспроизведены параллельным механизмом заданной структуры в рассмотренных случаях неопределенности положений e . В случае полностью определенных положений тела e , как известно из [2], это число определяется как

$$N_{\text{мех}} = \min_j N_j, \quad (1)$$

где N_j - максимальное число точно воспроизводимых положений звена e посредством j - й подцепи механизма, соединяющей e с системой отсчета. N_j определяется из неравенства

$$N_j \leq k_j / S_j, \quad (2)$$

где k_j - число искомым постоянных параметров, определяющих синтезируемую подцепь; S_j - число условий связи, налагаемых на тело e j - й подцепью.

В рассматриваемом нами случае неполностью определенных положений тела e выражение (1) неприменимо, поскольку максимальное число точно воспроизводимых положений зависит от соотношения между суммарными числами параметров $k_{\text{мех}}$ и условий связи $S_{\text{мех}}$, налагаемых подцепями, которые составляют данный механизм. Оно определяется заменой в (2) индекса “ j ” на индекс “мех”:

$$N_{\text{мех}} \leq k_{\text{мех}} / S_{\text{мех}}. \quad (3)$$

Раскрывая правую часть неравенства (3), получим

$$N_{\text{мех}} \leq \left[\sum_{j=1}^n k_j + m(N_{\text{мех}} - 1) \right] / \sum_{j=1}^n S_j, \quad (4)$$

где n - число присоединимых к телу подцепей; m - число неопределенных координат при задании положений тела e . Слагаемое $m(N_{\text{мех}} - 1)$ учитывает количество параметров, доопределяющих положение тела e , которые по условиям рассматриваемой задачи также подлежат определению. Преобразуя (4), окончательно получим

$$N_{\text{мех}} \leq \left(\sum_{j=1}^n k_j - m \right) / \left(\sum_{j=1}^n S_j - m \right). \quad (5)$$

Если механизм образован присоединением к e одинаковых подцепей, то выражение (5) принимает вид

$$N_{\text{мех}} \leq (nk - m) / (ns - m). \quad (6)$$

Применяя формулу (6) к синтезу семизвенника 5(CC) при $m = 1$, получаем $N_{\text{мех}} \leq 34/4$. Таким образом, число положений линии \overline{OZ} тела e , точно воспроизводимых рассматриваемым семизвенником, не может быть более восьми. Одновременно этот результат показывает, что можно построить одноподвижный манипулятор 5(CC), переводящий ось рабочего органа через 8 положений, произвольно расположенных в пространстве.

Синтез семизвенника 5(CC) в форме аппроксимационной задачи со связанными переменными. Опишем теперь альтернативный подход к рассматриваемой задаче синтеза, представив ее в виде задачи приближения со связанными переменными. Этот подход ранее был удачно использован авторами применительно к синтезу зубчатого рычажного механизма [7].

Данный алгоритм может быть использован и при синтезе механизмов с параллельной топологией, обозначив через

$$\Delta_{ijk} = \Delta_{ijk}(P^{jk}, q^i), i = 1, 2, \dots, N, j = 1, 2, \dots, n, k = 1, 2, \dots, n^{(j)} \quad (7)$$

отклонение точки или прямой объекта ϵ поверхностей, где j - номер подцепи, налагающей связи на движение объекта; k - номер уравнений связи в j -й цепи; i - номер положения объекта; $P^{jk} = (P_1^{jk}, P_2^{jk}, \dots, P_{n^{(j)}}^{jk})$ - вектор постоянных параметров j -й цепи, точки или прямой объекта, а $q^i = (q_1^i, q_2^i, \dots, q_m^i)$ - вектор доопределяющих обобщенных координат i -го положения объекта.

При Чебышевском приближении задача синтеза механизма с параллельной топологией приводится к определению таких значений постоянных P_v^{jk} ($j = 1, 2, \dots, N, j = 1, 2, \dots, n, k = 1, 2, \dots, n^{(j)}$) и переменных $q_1^i, q_2^i, \dots, q_m^i$, ($i = 1, 2, \dots, N$) параметров, при которых функция максимума

$$S(P, q) = \max_{i \in [1:N]} \max_{j \in [1:n]} \max_{k \in [1:n_j]} |\Delta_{ijk}(P^{jk}, q^i)|$$

принимает минимальное значение, т.е. требуется найти такие значения P^*, q^* искомым параметров, при которых

$$S(P^*, q^*) = \min_{\{P, q\}} S(P, q). \quad (8)$$

Решение нелинейной минимаксной задачи (8) связано с определенными трудностями вычислительного характера, поэтому далее предлагается численный метод, который позволяет решение нелинейной задачи (8) привести к последовательности решений хорошо разработанной задачи линейного дискретного Чебышевского приближения [8]. В связи с этим построим следующие линейные функции:

$$\bar{\Delta}_{ijk}(\lambda, \beta) = \sum_{v=1}^{n^{(jk)}} \frac{\partial \Delta_{ijk}}{\partial P_v^{jk}} \lambda_v^{jk} + \sum_{\mu=1}^m \frac{\partial \Delta_{ijk}}{\partial q_\mu^i} \beta_\mu^i + \Delta_{ijk} \quad (9)$$

относительно вспомогательных параметров λ_v^{jk} и β_μ^i и рассмотрим функцию максимума

$$\bar{S}(\lambda, \beta) = \max_{i \in [1:N]} \max_{j \in [1:n]} \max_{k \in [1:n_j]} |\bar{\Delta}_{ijk}(\lambda, \beta)|. \quad (10)$$

Далее решение задачи (8) производим по следующему алгоритму:

1. Задаем начальными значениями и $q^{io} = (q_1^{io}, q_2^{io}, \dots, q_m^{io})$ искомым параметрам и для них строим линейные функции (9).

2. Методом линейного Чебышевского приближения [8] определяем такие значения λ_v^{jk} и β_μ^i , при которых

$$\bar{S}(\lambda^*, \beta^*) = \min_{\{\lambda, \beta\}} \bar{S}(\lambda, \beta).$$

3. Определяем $P^{jk1} = (P_1^{jk0} + \lambda_1^{jk*}, \dots, P_{n(jk)}^{jk*} + \lambda_{n(jk)}^{jk*})$ и

$$q^{i1} = (q_1^{i0} + \beta_1^{i*}, \dots, \beta_m^{i*}) (i = 1, 2, \dots, N, j = 1, 2, \dots, n, k = 1, 2, \dots, n(j))$$

4. P^{jko}, q^{io} заменяем на P^{jk1}, q^{i1} и переходим к пункту 1.

Предлагаемый процесс прекращаем, когда $|\lambda_v^{jk*}| \leq \varepsilon$ и $|\beta_\mu^{i*}| \leq \varepsilon$, где ε - заданная точность вычислений.

Описанный алгоритм удачно апробирован на уже рассмотренном примере синтеза одноподвижного направляющего семизвенника типа 5(СС) (рис.1). Показана достаточно быстрая сходимость.

Заключение. Впервые рассмотрена задача аппроксимационного синтеза одноподвижных манипуляционных механизмов для приближенного воспроизведения неограниченного числа неполностью определенных конечноудаленных положений твердотельного объекта, что позволяет построить простейшие одноприводные манипуляторы для реализации заданных программ перемещения точечных, линейных, плоскостных элементов объекта. Разработаны быстросходящие итерационные алгоритмы решения рассматриваемой задачи, которые иллюстрируются на примере синтеза направляющего семизвенника типа 5(СС). Предложенные подходы могут быть эффективно использованы также при синтезе манипуляторов с двумя и более степенями свободы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Саркисян Ю. Л. Аппроксимационный синтез механизмов. - М.: Наука, 1982.- 304 с.
2. Кинематика, динамика и точность механизмов: Справочник / Под редакцией Г. В. Крейна. Саркисян Ю. Л. Глава 2. Кинематический синтез пространственных стержневых механизмов.- М.: Машиностроение, 1984.- 214 с.
3. Саркисян Ю. Л., Степанян К. Г., Шахпаронян С. Ш., Карпетян Г. П. Алгоритмы решения аппроксимационных задач синтеза рычажных механизмов с билинейными функциями отклонения // Труды Четвертого Международного симпозиума "СИРОМ - 85". - Бухарест, 1985. - Т. 1 - 2. - С. 397 - 404.
4. Саркисян Ю. Л., Степанян К. Г. и др. Унифицированный итерационный метод аппроксимационного синтеза рычажных механизмов для управляемого перемещения твердого тела. -М., Машиноведение 1, 1987.
5. Саркисян Ю. Л., Парикян Т.Ф., Степанян К. Г., Харатян А. Г. Проектирование одноподвижных и двухподвижных параллельных манипуляторов для обработки криволинейных поверхностей и сварки

- пространственных швов // Сборник трудов Международной конференции МНТК “Технология и техника автоматизации”. – 2008. – 6с.
6. **Zamanov V. B., Sotirov Z.M.** Parallel Manipulators in Robotics // MACS/SICE Int. Symp. on Robotics, Mechanotronics and Manufacturing Systems, Kobe, 16 -20 Sept., 1992.- P. 409 – 418.
 7. **Sarkissyan Y.L., Stepanyan K.G., Shakhparonyan S.S., Karapetyan G.P.** Minimax Problems with Bound Variables in Synthesis of Mechanisms // Trans. of the IV IFToMM Intern. Symp. on Linkages and Computer Aided Design Methods, Bucharest, Romania, 1985. -Vol. 1 – 2. - P. 151 – 154.
 8. **Desclous J.** Degenerescence dans les approximations de Tsebyscheff lineaires et discrete // Numerische Mathematik -1961.-№ 3.- P. 180 - 187.
 9. ГИУА. Материал поступил в редакцию 11.01.2008.

**ՅՈՒ. Լ. ՍԱՐԳՍՅԱՆ, Տ. Ֆ. ՓԱՐԻԿՅԱՆ, Կ. Գ. ՍՏԵՓԱՆՅԱՆ,
Ա.Գ. ԽԱՌԱՏՅԱՆ**

**ԶՈՒԳԱՆԵՌ ՄԱՆԻՊՈՒԼՅԱՏՈՐՆԵՐԻ ՄՈՏԱՎՈՐ ՆԱԽԱԳԾՈՒՄ ԸՍՏ ԵԼՔԻ ՕՂԱԿԻ ՈՉ
ԼՐԻՎ ՈՐՈՇՎԱԾ ԴԻՐՔԵՐԻ**

Դիտարկվում է տարածության մեջ օբյեկտի ոչ լրիվ որոշված դիրքերի բազմության մոտավոր վերարտադրության խնդիրը: Ներկայացված են խնդրի լուծման երկու պարզեցված մոտեցումներ. լուծման հանգեցումը օբյեկտի լրիվ որոշված դիրքերի վերարտադրության և կապակցված փոփոխականներով մոտարկման խնդրի տեսքով ներկայացումը: Մշակված են զուգահեռ մանիպուլյատորների մոտավոր նախագծման և կինեմատիկ հետազոտության ընթացակարգեր և ծրագրեր: Բերված է թվային օրինակ:

Առանցքային բառեր. զուգահեռ մանիպուլյատորներ, մոտավոր նախագծում, ոչ լրիվ որոշված դիրքեր, կապակցված փոփոխականներ:

Y.L. SARKISSYAN, T.F. PARIKYAN, K.G. STEPANYAN, A.G. KHARATYAN

**APPROXIMATE SYNTHESIS OF PARALLEL MANIPULATORS ON OUTPUT LINK
INCOMPLETELY SPECIFIED POSITIONS**

Approximate generation of incompletely specified positions of object in 3D space is studied. The solution of this problem in general is extremely complicated. Two simplified approaches to solve this problem are presented. The first approach leads to the case of completely specified positions of rigid body. The second approach leads approximate synthesis to the approximation problem with bound variables. Algorithms and programs are developed for approximate synthesis and kinematic analysis of parallel manipulators, based on the proposed methods. The numerical example is presented.

Keywords: parallel manipulators, approximate synthesis, incompletely specified positions, bound variables.

О.И. ДРАЧЕВ, Г.В. ТАРАНЕНКО, В.А. ТАРАНЕНКО, А. СВИЦЬ

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВИБРАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ ГЛУБОКИХ ОТВЕРСТИЙ

Дается обоснование метода вибрационного сверления отверстий инструментом с переменной жесткостью. Рассматриваются конструкции сверильной головки с регулируемой жесткостью, волноводов, преобразующих энергию процесса резания в комплексные крутильно-продольные колебания режущего инструмента. Представлены схема экспериментального стенда, методика и результаты исследований в виде АЧХ колебаний инструмента в различных направлениях при традиционном и вибрационном сверлении глубоких отверстий. Приведены сравнительный анализ и результаты повышения точности обработки при вибрационном сверлении.

Ключевые слова: вибрационное сверление, автоколебания, волновод, преобразователь, точность обработки, эффективность.

Для интенсификации сверления глубоких отверстий (повышения производительности, точности, качества обработанной поверхности) разработаны и апробированы различные способы и средства технологического воздействия на заготовку и инструмент, в том числе и автоматического управления параметрами процесса сверления [1]. Другое направление базируется на использовании управляемых колебаний элементов технологической системы (ТС), как правило, инструмента. Некоторые исследователи [2] используют внешние источники колебательного движения, действие которых направлено, как правило, на повышение точности обработки, при этом частота колебаний инструмента достигает несколько тысяч герц. Недостатками принудительного возбуждения колебаний инструмента являются: необходимость использования специального оборудования с вибраторами; при сверлении режущим инструментом с длинным податливым стеблем закон движения режущих кромок не соответствует закону накладываемых вибраций, и их эффект ослабляется или прекращается. Другие методы вибрационного сверления [3] основаны на использовании энергии автоколебательных движений элементов замкнутой технологической системы и служат, в основном, для дробления стружки, а рабочие частоты находятся в пределах нескольких сотен герц.

Обоснование метода вибрационного сверления инструментом с переменной жесткостью. Относительные колебания заготовки и инструмента в радиальном направлении ухудшают точностные показатели обработанного отверстия. Особенно опасно наступление резонанса при частотах, соответствующих собственным изгибным колебаниям заготовки или инструмента, при котором резко увеличивается амплитуда радиальных относительных смещений. Относительные продольные колебания заготовки и инструмента способствуют дроблению стружки, повышению точности и снижению шероховатости при сверлении отверстий. При обработке пластичных материалов это приводит к образованию нароста на инструменте, а в случае, когда твердость обрабатываемого материала одного порядка с твердостью материала инструмента,

происходит выкрашивание режущих кромок. Колебания в направлении резания в общем случае наиболее благоприятны для повышения точности и снижения шероховатости обработанной поверхности. Учитывая, что при сверлении поверхность резания является винтовой, вибрация инструмента в крутильном направлении приводит к повышенному износу инструмента по задней поверхности, которая будет периодически с частотой крутильных колебаний контактировать с поверхностью резания.

Частота и амплитуда применяемых вибраций могут быть различными для разных целей. Для дробления стружки применяются колебания в низкочастотном диапазоне – до 200 Гц. Высокочастотные (200...1500 Гц) и ультразвуковые (свыше 15 кГц) вибрации оказывают качественное влияние на механизм стружкообразования и используются для улучшения обрабатываемости материалов. Если в качестве источника вибраций используются автоколебания инструмента в процессе резания, их частота и амплитуда либо не регулируются, либо изменяются при настройке оборудования за счет подбора упругого элемента заданной жесткости.

Конструкция сверлильной головки с переменной жесткостью. Для сверления отверстий (в том числе глубоких) в маложестких осесимметричных деталях типа вала, гильзы, тонкостенной втулки и т. п. с использованием комплексных крутильно–продольных автоколебаний инструмента на станках токарного типа была разработана конструкция сверлильной головки с переменной жесткостью инструмента. В основу конструкции входит волноводный преобразователь (ВП) в виде борштанги со сквозным винтовым пазом. Для регулировки жесткости предлагается использовать принцип перемещения “сплошного сечения” [4] при изменении вылета сверла. Головка для вибрационного сверления с использованием автоколебаний (рис.1) устанавливается на суппорт токарного станка.

Сверлильная головка содержит корпус 1. Инструмент (не показан) устанавливается в коническое гнездо 2 резонатора комплексных колебаний 3 ВП, жестко закрепленного в ползуне 4 по коническому хвостовику 5. Ползун 4 с резонатором комплексных колебаний 3 имеет возможность осевого перемещения относительно корпуса 1 при помощи винта 6. Фиксация положения ползуна 4 с резонатором комплексных колебаний 3 относительно корпуса 1 происходит при помощи конических штифтов 7 и крышки 8.

Механизм вибрационной обработки достигается за счет применения в конструкции сверлильной головки резонатора комплексных колебаний 3 – ВП – упругого элемента, преобразующего энергию процесса резания в комплексные крутильно–продольные колебания режущего инструмента, характеризующиеся определенной частотой и амплитудой. Вибрации генерируются за счет упругого элемента ВП с относительно низкой жесткостью в крутильном и осевом направлениях, представляющего собой переходную втулку специфической формы для установки сверла. Конструкция преобразователя содержит сквозной винтовой паз, который может быть различной модификации (рис. 2).

Изменение его вылета – длины консольной части - обеспечивает возможность регулировки амплитуд и частот вибраций инструмента при обработке в некоторых пределах и, следовательно, оптимизации процесса сверления по критерию точности, производительности, стойкости инструмента и т.д. Регулировка достигается за счет изменения рабочей длины волновода, то есть длины паза до “сплошного сечения”. Для создания “сплошного сечения”

предлагается использовать два конических штифта, которые вставляются с натягом в паз в рабочем состоянии сверлильной головки и располагаются в нем с зазором в состоянии регулировки рабочей длины волновода.

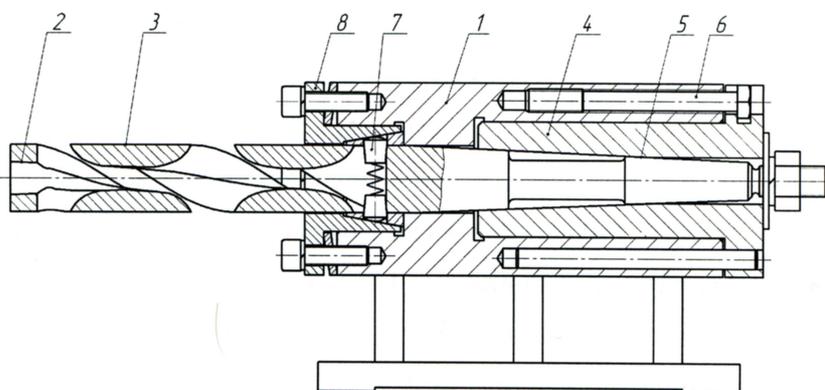


Рис. 1. Сверлильная головка с регулируемой жесткостью

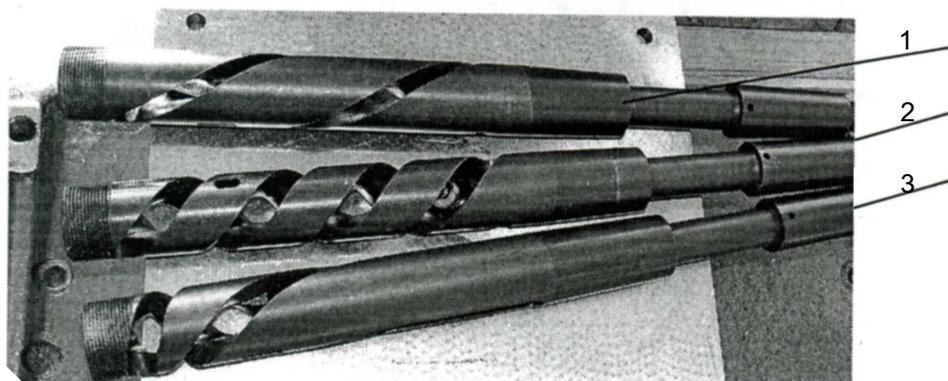


Рис. 2. Вспомогательные элементы для сверл (ВП):
1, 2 – с равномерным шагом паза, 3 – с переменным шагом

Экспериментальные исследования процесса вибрационного сверления. Для апробации способа вибрационного сверления была разработана установка, показанная на рис.3. Помимо вибросверлильной головки 2, установленной на суппорте токарного станка 1 (мод. 16К20), в технологическую систему входят система дополнительных опор – самоцентрирующихся гидролюнетов 3 [5, 6], установленных на станине станка при помощи кронштейна (их число подбирается исходя из длины и диаметра заготовки); измерительно-записывающая система из двух токовихревых датчиков ENTLY-NEVADA 4, связанных через многоканальный аналого-цифровой преобразователь Р А/С (Е440 L-Card) с цифровым осциллографом, установленным на РС 7.

Заготовка представляла собой прутки диаметром $d = 22$ мм, длиной 240 мм из стали 40Х ГОСТ 4543-71. Инструмент – стандартное спиральное сверло диаметром $d = 16$ мм, длина режущей части 110 мм, материал режущей части Р6М5Ф3. Был проведен эксперимент по

исследованию влияния параметров технологической системы (вылета инструмента и режимов обработки) на спектр продольных, изгибных и крутильных колебаний, соотношение амплитуд и частот продольных и крутильных, изгибных и крутильных колебаний и их влияния на точностные параметры обработанного отверстия.

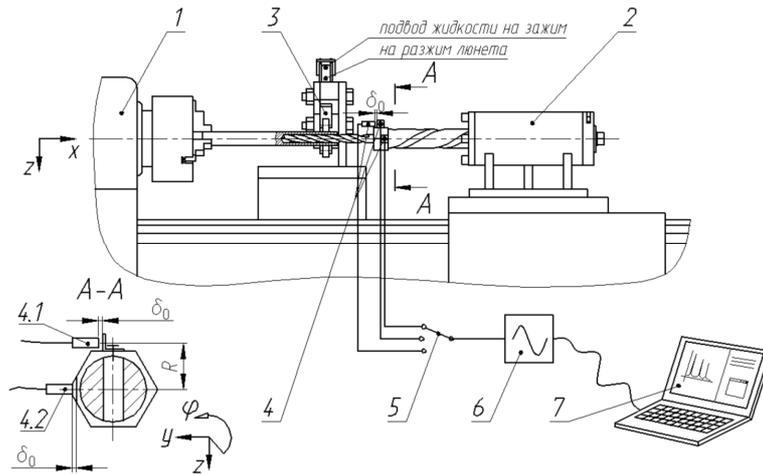


Рис. 3. Схема экспериментальной установки

К входным, варьируемым технологическим параметрам относятся:

1) конфигурация ВП принимает два значения V_1 и V_2 , где V_1 - ВП с постоянным шагом винтового паза, V_2 - ВП с переменным шагом;

2) длина рабочей части (вылет) ВП принимает три значения: $l_1=100$ мм, $l_2 = 140$ мм, $l_3 = 190$ мм;

3) скорость резания при сверлении принимает три значения: при частотах вращения шпинделя $n_1 = 250$ об/мин., $n_2 = 315$ об/мин., $n_3 = 400$ об/мин. и диаметре сверла $d=16$ мм скорости резания равны соответственно $v_1 = 12,57$ м/мин., $v_2 = 15,83$ м/мин., $v_3 = 20,11$ м/мин.

Выходными факторами эксперимента являются: точность размеров, радиальное биение поверхности относительно базы на оси вращения заготовки, шероховатость обработанной поверхности. В ходе эксперимента также отслеживались промежуточные параметры, зависящие от входных и оказывающие влияние на выходные факторы. К ним относятся амплитудно-частотные характеристики продольных, поперечных и крутильных колебаний инструмента $A_x(f_x), A_y(f_y), A_\varphi(f_\varphi)$.

При сверлении отверстий спиральным сверлом с использованием ВП значения осевой силы и закон ее изменения во времени оказывают влияние на измеряемые в эксперименте крутильные колебания за счет коэффициента $k_{\varphi x}$. Наличие этого коэффициента обусловлено нелинейностью колебательной системы сверла с ВП в том смысле, что силовое воздействие на систему в осевом направлении приводит не только к осевому смещению, но и к закручиванию.

В процессе сверления отверстия датчиками измерялись зазоры в направлении y – поперечные смещения инструмента (рис.3). Поперечное смещение в направлении y определяется разностью показаний датчика и начального зазора δ_0 : $\delta_y = \delta_2 - \delta_0$.

Угол закручивания ВП определялся, исходя из разности показаний датчиков: $\delta_\phi \approx (\delta_1 - \delta_2) / R$ [rad], где R - расстояние от датчика 4.1 до горизонтальной координатной плоскости xOy (рис.3). Информация с двух датчиков поступает на ПА/С (E440 L-Card), в котором она преобразуется в цифровой вид и передается на цифровой осциллограф, где обрабатывается, выводится на экран и сохраняется в виде текстового файла в постоянном запоминающем устройстве. Спектральный анализ проводился в автоматическом режиме программным обеспечением для цифрового осциллографа PC_Lab – 2000. Точностные параметры обработанного отверстия измерялись относительно наружной цилиндрической поверхности детали, которая является технологической базой на операции сверления.

Эксперимент состоял из двух этапов – по модификациям ВП (B_1 и B_2). Каждый этап разделялся на три серии опытов по величине вылета ВП (l_1, l_2, l_3). В каждой из серий проводилось по три опыта с разной величиной скорости резания (V_1, V_2, V_3). Для исключения влияния различных случайных неучтенных факторов на результат эксперимента каждый опыт проводился по три раза.

В ходе анализа полученных результатов были выявлены случаи возникновения автоколебаний в процессе резания. Анализировались амплитудно – частотные характеристики колебаний в диапазоне 0...4000 Гц.

Интенсивные колебания в процессе сверления на частотах от 1000 до 3000 Гц возникали в крутильном и продольном направлениях при использовании ВП с неравномерным шагом винтового паза. При этом наблюдалось совпадение резонансных (пиковых) частот крутильных и продольных колебаний в рассматриваемом частотном диапазоне (рис.4).

Крутильно–продольные колебания обусловлены рядом факторов. Первый резонансный пик комплексных колебаний соответствует частоте вращения заготовки (4...10 Гц). Амплитуда колебаний на этой частоте зависит от несимметричности заточки инструмента, неуравновешенности заготовки и относительного смещения оси вращения заготовки и оси инструмента. Второй пик соответствует частоте стружкообразования (колеблется в зависимости от скорости резания и коэффициента усадки стружки в пределах 400...500 Гц). При определенных условиях возможно возникновение устойчивых комплексных крутильно-продольных автоколебаний (частота при разной жесткости ВП 1100, 1580, 2080, 2880 Гц). Их частота определяется характеристиками динамической системы процесса сверления и не зависит от частоты вращения заготовки. Амплитуда автоколебаний зависит как от жесткости подсистемы инструмента, так и, в значительной степени, от скорости резания. На амплитудно-частотных характеристиках продольных и крутильных колебаний инструмента в процессе резания присутствуют резонансные пики на одних и тех же частотах (1580, 2000, 2880 Гц); при этом на АЧХ изгибных колебаний резонансных пиков, соответствующих этим частотам, не

отмечается. Это позволяет утверждать, что такое колебательное движение происходит по винтовой линии, то есть является крутильно-продольным.

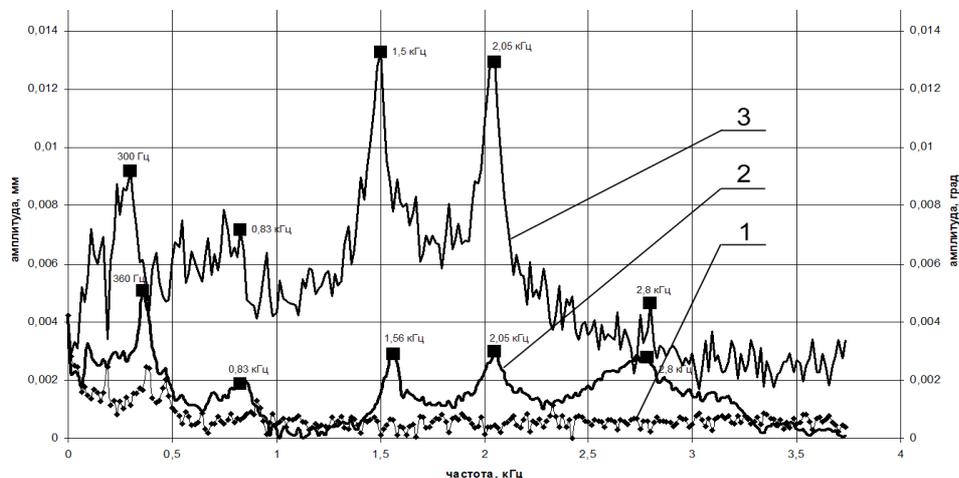


Рис. 4. АЧХ колебаний подсистемы инструмента в различных направлениях:
1 – поперечном (мм); 2 – осевом (мм); 3 – крутильном (град)

Рост частоты вращения заготовки и, соответственно, скорости резания приводит, во-первых, к линейному росту частоты первой гармоники процесса, которая связана с частотой вращения напрямую; во-вторых, к линейному росту кратных частот, амплитуда которых в ряде случаев больше амплитуды первой гармоники; в-третьих, к линейному росту частоты гармоники, связанной с частотой стружкообразования.

На автоколебания в крутильно-продольном направлении с частотой 1...2 кГц скорость резания влияния не оказывает. Изменение вылета ВП через изменение жесткости влияет на собственные частоты подсистемы инструмента и на частоту автоколебаний: при увеличении вылета жесткость и соответствующие частоты относительных колебаний уменьшаются. Применение ВП с равномерным шагом паза не приводило к таким результатам. Не наблюдалось высокочастотных комплексных колебаний инструмента. В изгибном направлении интенсивных колебаний на частотах выше 200...300 Гц не возникало. Изгибные колебания характеризовались наличием максимальной амплитуды на частоте, соответствующей частоте вращения заготовки. Также довольно высокое значение амплитуды соответствовало частотам, кратным частоте вращения. Возникновение интенсивных крутильно-продольных колебаний приводило к снижению пиковой амплитуды в поперечном направлении по сравнению с базовым вариантом – сверление без ВП (рис.5).

Это связано с обеспечением прерывистого процесса резания и демпфированием поперечных колебаний. Был определен технологический режим обработки сверлением, обеспечивающий максимальную точность обработанного отверстия (радиальное биение 12 мкм, точность размера – 7...8 квалитет, непрямолинейность оси 0,01/100 мм) и шероховатость обработанного отверстия в пределах Ra 5 мкм. Этот режим характеризуется наличием продольно-крутильных автоколебаний (1100, 1580, 2000 Гц) с амплитудой, близкой к размеру

зерна материала заготовки (3...5 мкм). АЧХ изгибных колебаний характеризуются малой амплитудой и равномерным спектром.

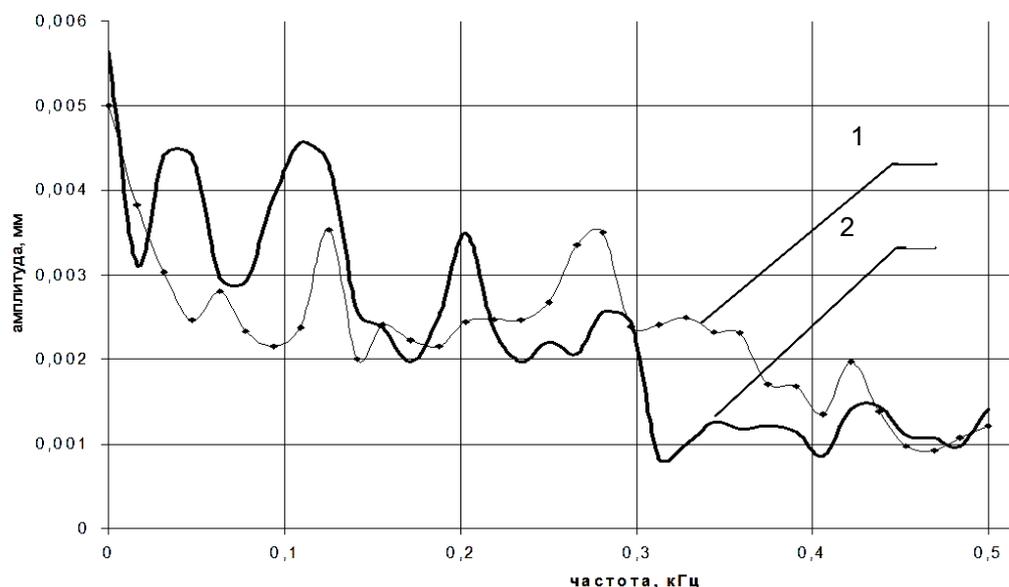


Рис. 5. АЧХ поперечных колебаний инструмента при различной обработке:
1 – традиционная обработка; 2 – обработка с ВП

Анализ круглограмм (рис.б) выявил технологический режим, при котором наблюдается минимальное биение ($\Delta = 12$ мкм) профиля отверстия образца относительно технологической базы – наружной поверхности: модификация ВП – В₁ (с неравномерным шагом паза); вылет - $l_2 = 140$ мм; частота вращения заготовки $n_3 = 400$ об/мин. Этот образец также характеризуется минимальными значениями увода и разбивки отверстия, малой амплитудой поперечных колебаний, наличием интенсивных крутильно-продольных колебаний.

Повышение точности связано с реализацией механизма вибрационного резания и снижением сил резания, в том числе и ее поперечной составляющей. На этом режиме зафиксировано наибольшее снижение сил резания, характеризующееся минимальным значением нагрузки на приводах главного движения и подачи. Это связано со снижением сопротивления резанию в результате реализации механизма вибрационного резания с оптимальным для данных условий сочетанием амплитуд крутильной и продольной составляющих колебаний, их частотами. При этом обработка по базовому варианту без применения ВП характеризовалась точностью 9...10 квалитет, радиальное биение отверстия 0,08...0,1 мм, шероховатость поверхности отверстия Ra 12,5 мкм.

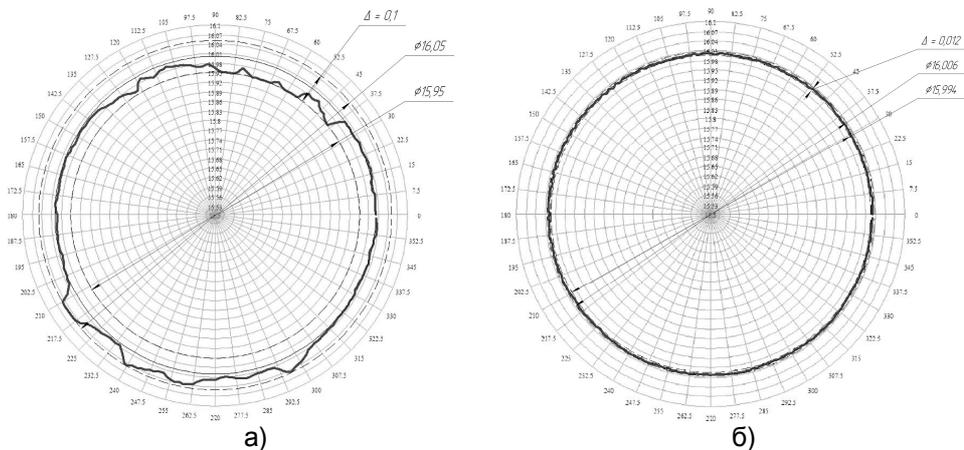


Рис. 6. Сравнительный анализ круглограмм просверленных отверстий:
 а - традиционное сверление ($n = 400 \text{ об/мин.}$), б - сверление с ВП
 ($l = 140 \text{ мм}$, $n = 400 \text{ об/мин.}$)

Заключение. При использовании ВП с переменным шагом паз в процессе резания возникают комплексные (крутильно-продольные) колебания инструмента. Причиной поперечных относительных колебаний заготовки и инструмента, в основном, является отклонение расположения оси вращения детали и оси инструмента. Амплитуда поперечных колебаний снижается при наличии устойчивых крутильно-продольных колебаний вследствие обеспечения прерывистости процесса резания, снижения сил резания и демпфирования поперечных смещений.

Выявлены общие закономерности зависимости спектра частот относительных крутильно-продольных и поперечных колебаний колебаний заготовки и инструмента в процессе резания от частоты вращения и вылета ВП. Определен технологический режим обработки сверлением, обеспечивающий максимальную точность (радиальное биение 12 мкм , точность размера $7...8$ квалитет, непрямолинейность оси $0,01/100 \text{ мм}$) и шероховатость обработанного отверстия в пределах $Ra 5 \text{ мкм}$, то есть точность обработки повысилась на порядок по сравнению с обработкой без ВП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тараненко В.А., Левченко А.И. Управление процессом сверления глубоких отверстий малого диаметра.-Politechnika Opolska: Opole, 2003. – 128 с.
2. Подураев В.Н. Обработка резанием с вибрациями.-М.: Машиностроение, 1970. – 350 с.
3. Кумабэ Д. Вибрационное резание: Пер с яп. С.Л. Масленникова / Под ред. И. И. Портнова, В. Белова. – М.: Машиностроение, 1985. – 424 с.
4. Патент № 2169058. Устройство для обработки глубоких отверстий / О. И. Драчев, Д. А. Расторгуев, О. В.Бойченко. -2001.- Бюл. № 17.

5. **Drachow O., Taranenko W.** Technologia modułowa wytwarzania osiowosymetrycznych wałów długowymiarowych // Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej NR 230 MECHANIKA, Z. 67 - Modułowe Technologie i Konstrukcje w Budowie Maszyn. –Rzeszyw, 2006. – S. 47 – 50.
6. **Драчев О. И., Тараненко, Г. В., Тараненко В. А.** Экспериментальные исследования стабилизации оси маложесткой детали при использовании самоцентрирующих люнетов // Автоматизация: Проблемы, Идеи, Решения: Материалы междунар. научн.-техн. конф., г. Севастополь, 8-13 сентября 2008 г. - Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2008. – С. 135 – 139.

ГГУ, СевНТУ, ЛТУ, г. Тольятти, г. Севастополь, г. Люблин, Россия, Украина, Польша.
 Материал поступил в редакцию 11.01.2008.

Օ.Ի. ԴՐԱՉԵՎ, Գ.Վ. ՏԱՐԱՆԵՆԿՈ, Վ.Ա. ՏԱՐԱՆԵՆԿՈ, Ա. ՍՎԻՑ

ԽՈՐ ԱՆՑՔԵՐԻ ԹՐԹՈՒՄՇԱԿՄԱՆ ԱՐԴՅՈՒՆԱՎԵՏՈՒԹՅԱՆ ԲԱՐՁՐԱՑՈՒՄԸ

Հիմնավորվում է փոփոխական կոշտությամբ անցքերի թրթռագայլիկոնման եղանակը: Ներկայացված են կարգավորվող կոշտությամբ գայլիկոնման գլխուկի և ալիքատարների կոնստրուկցիաները, որոնք կտրման գործընթացի էներգիան փոխակերպում են կտրող գործիքի պտտա-երկայնական տատանումներով: Ներկայացված են փորձարարական ստենդի սխեման, ավանդական և թրթռումներով խոր անցքերի գայլիկոնման հետազոտությունների արդյունքները և մեթոդաբանությունը՝ գործիքի տարբեր ուղղություններով տատանումների ԱՀԲ-ի տեսքով: Բերված են թրթռագայլիկոնման մշակման ճշտության բարձրացման արդյունքները ու համեմատական վերլուծությունը:

Առանցքային քաներ. թրթռագայլիկոնում, ավտոտատանումներ, ալիքատար, փոխակերպիչ, մշակման ճշտություն, արդյունավետություն:

O.I. DRACHOV, G.V. TARANENKO, V.A. TARANENKO, A. SWIC

VIBRATING EFFICIENCY INCREASE PROCESSING OF DEEP APERTURES

The reason of using vibratory method for deep holes drilling is introduced. The construction of the drilling head with changing rigidity as well as the construction of wave converter and the model of research stand are presented. Results of experimental research and the comparative analysis of accuracy coefficients for conventional and vibratory drilling with the use of wave converters are shown.

Keywords: vibrating drilling, self-oscillations, wave guide, converter, accuracy of processing, efficiency.

Ա.Հ. ԱԲՈՅԱՆ, Հ.Ռ. ԴՐՄԵՅԱՆ, Տ.Ն. ՍԱՖԱՐՅԱՆ

ԼՅՈՒԹԵՐԻ ՀԱՄԱՍԵՌՈՒԹՅԱՆ ՀԵՏԱԶՈՏՄԱՆ ԻՆՏԵՐՖԵՐԱԶԱՓԱԿԱՆ ՄԵԹՈԴՆԵՐ

Փորձնականորեն ցույց է տրվել, որ նմուշների միջով, որոնցում նյութի խտությունը բաշխված է անհամասեռ, վերադրվող ռենտգենյան ալիքների նախնական անցման դեպքում այդ ալիքներում առաջանում են ոչ մշտական փուլային տեղաշարժեր, որոնց արդյունքում դիտվող ինտերֆերենցիոն պատկերներն անհետանում են: Հետազոտելով երկբյուրեղ կրկնակի ինտերֆերաչափում առաջացած շեղման գծերի և եռաբյուրեղ ինտերֆերաչափում առաջացած ճոճանակային շերտերի ցայտունությունը՝ կարելի է գնահատել նմուշներում նյութի խտության բաշխման համասեռության աստիճանը:

Առանցքային բառեր. ռենտգենյան ինտերֆերաչափ, ինտերֆերենցիոն պատկերներ, մուարի պատկերներ, շեղման գծեր, հավասար հաստության շերտեր, ճոճանակային շերտեր, կոհերենտ ալիքներ:

1.Ներածություն: Ինչպես հայտնի է [1-3], ինտերֆերենցիոն պատկերի դիտման համար անհրաժեշտ է, որպեսզի այն գոնե իր դիտման համար անհրաժեշտ ժամանակի ընթացքում չփոփոխվի, ինչը հանգեցնում է ինտերֆերենցիոն պատկերն առաջացնող վերադրվող ալիքների միջև փուլերի տարբերությունների հաստատուն լինելու կամ բավականաչափ դանդաղ փոփոխության պահանջին: Այսպիսով, ինտերֆերենցիոն պատկերի դիտման հնարավորությունը պայմանավորված է ժամանակի ընթացքում իր դանդաղ փոփոխությամբ և գրանցող սարքի արագագործությամբ. ինչքան արագ են փոփոխվում ինտերֆերենցիոն ալիքների միջև փուլերի տարբերությունները, այնքան պետք է արագագործ լինի գրանցող սարքը և հակառակը:

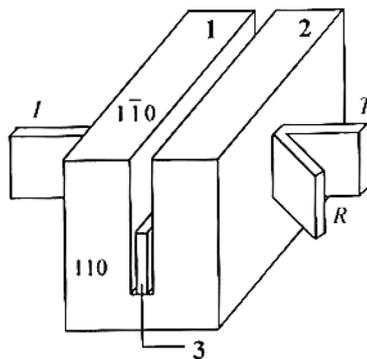
Այսպիսով, ինտերֆերենցիոն պատկերների հայտնաբերման, դիտման կամ գրանցման համար (պատկեր-գրանցող) համակարգը պետք է ունենա համապատասխան ժամանակային լուծաչափություն: Սակայն դժվար չէ համոզվել նրանում, որ ինտերֆերենցիոն պատկերների դիտման համար դա բավարար չէ: Իրոք, եթե նույնիսկ ինտերֆերենցիոն ալիքների միջև փուլերի տարբերությունը ժամանակից կախված չէ (ժամանակային լուծաչափությունը անվերջ մեծ է), սակայն դիտվող ինտերֆերենցիոն դաշտի մի կետից մյուսն այն արագ փոփոխվում է, հետևաբար այդ ինտերֆերենցիոն դաշտի կառուցվածքի մասերը և դրանց միջև հեռավորություններն այնքան փոքր են, որ ինտերֆերենցիոն պատկերը դիտել հնարավոր չէ: Ուստի, համակարգը, բացի ժամանակային լուծաչափությունից, պետք է օժտված լինի նաև բավարար տարածական լուծաչափությամբ. եթե ռենտգենաինտերֆերենցիոն պատկերի մասերի չափերը և նրանց միջև հեռավորությունները միկրոմետրից շատ փոքր են, ապա այդպիսի պատկերը դիտել հնարավոր չէ:

Ինտերֆերենցիոն դաշտի այդ հատկությունը կարելի է օգտագործել նյութերի համասեռության աստիճանը որոշելու համար: Իրոք, եթե երկու կոհերենտ ալիքներից մեկի կամ երկուսի դիմաց դրվի անհամասեռ նյութ, ապա ինտերֆերենցիոն պատկերը կանհետանա:

Նյութի խտության՝ կոորդինատից կախված պատահական փոփոխությունների դեպքում, միջավայրում նույնպիսի պատահականությամբ կարող են փոփոխվել և բեկման ցուցիչը, և ալիքի փուլը: Ուստի, այն դեպքում, երբ մինչև վերադրվելը ալիքներից մեկն անցնում է անհամասեռ խտություն ունեցող նյութի միջով, համակարգի տարածական լուծաչափությունը խիստ ընկնում է, և ռենտգենահիստերֆերենցիոն պատկերի դիտումը (գրանցումը) դառնում է անհնարին: Այսպիսով, հանգում ենք հետևյալ եզրակացության. եթե ինտերֆերենցվող ալիքների (մինչև նրանց վերադրումը) միջավայրով անցման արդյունքում ինտերֆերենցիոն պատկերն անհետանում է, ապա այդ միջավայրում խտության բաշխումն անհամասեռ է, և հակառակը, եթե ինտերֆերենցիոն պատկերը չի անհետանում այդ միջավայրում, նյութի խտության բաշխվածությունն համասեռ է:

Աշխատանքի նպատակը բարձր զգայնության ռենտգենահիստերֆերաչափական մեթոդների մշակումն է՝ նյութերի նմուշներում խտության բաշխվածության համասեռության հետազոտությունների համար:

2. Փորձարարական մաս: Միջավայրում (նմուշում) նյութի խտության բաշխման ռենտգենահիստերֆերաչափական հետազոտությունների համար մեր կողմից հատուկ նախագծվել և պատրաստվել է սիլիցիումի միաբյուրեղից երկբյուրեղ կրկնակի (բազմապատիկ) ռենտգենյան ինտերֆերաչափ, որը պատկերված է նկ.1- ում:



Նկ. 1. Ճառագայթների ընթացքը կրկնակի ինտերֆերաչափում.
 I , T , R -ը ընկնող, անցնող և դիֆրակցված փնջերն են,
 1, 2-ը ինտերֆերաչափի բյուրեղներն են, 3-ը հետազոտվող նմուշն է

Ինտերֆերաչափի բազմապատիկություն ասելով հասկանում ենք Լաուե-Լաուե անդրադարձումների համար հարմար դասավորված սիմետրիկ համարժեք հարթությունների ընտանիքը, որը ցույց է տրված նկ.1- ում [4]:

Կրկնակի ինտերֆերաչափի (անդրադարձնող ընտանիքների երկու սիմետրիկ համարժեք հարթությունների) համար հարմար է օգտվել (110) և $(1\bar{1}0)$ ընտանիքներից: Ինչպես երևում է

$$\cos \alpha = \frac{h_1 h_2 + k_1 k_2 + l_1 l_2}{\sqrt{h_1^2 + k_1^2 + l_1^2} \sqrt{h_2^2 + k_2^2 + l_2^2}} \quad (1)$$

բանաձևից և նկ. 1-ից, ուժեղ անդրադարձնող (110) և ($\bar{1}\bar{1}0$) հարթությունների ընտանիքները միմյանց ուղղահայաց են: Եթե այդ ընտանիքներից մեկը բերվում է անդրադարձման դիրքի, ապա մյուս ընտանիքը նույն դիրքին բերելու համար անհրաժեշտ է ինտերֆերաչափը պտտել 90° -ով ինտերֆերաչափի մուտքի մակերևույթին ուղղահայաց առանցքի շուրջը:

Այսպիսով, ստեղծվում են երկբյուրեղ կրկնակի ինտերֆերաչափից միանման ինտերֆերենցիոն պատկերներ ստանալու պայմաններ: Ինտերֆերաչափը բաղկացած է միանման և միատեսակ կողմնորոշված սիլիցիումի բյուրեղներից, որոնք կտրված են միևնույն ձուլակտորից և ունեն միևնույն հիմքը: Այդ բյուրեղների միջև հեռավորությունն ավելի փոքր է, քան առաջին բյուրեղի հաստությունը: Ինտերֆերաչափի այդպիսի կառուցվածքի դեպքում, երբ առաջին բյուրեղի վրա ընկնում է սֆերիկ կամ δ -ձև ալիք, անկման և անդրադարձման ուղղություններով դիֆրակցված ալիքները միմյանց հետ վերադրվում են երկրորդ բյուրեղի մուտքի մակերևույթի վրա, և ինտերֆերենցիայի արդյունքում երկրորդ բյուրեղի հետևում առաջանում են ինտերֆերենցիոն շեղման գծեր, որոնց պարբերությունը որոշվում է հետևյալ բանաձևով [5].

$$\sigma_{n,n+1} = \left| \frac{n+1}{\sqrt{l^2 + (n+1)^2 \Delta^2}} - \frac{n}{\sqrt{l^2 + n^2 \Delta^2}} \right| \text{tg} \theta_p \cdot \Delta(z_1 + z_2), \quad (2)$$

որտեղ l -ը բյուրեղների միջև հեռավորությունն է, n -ը՝ շերտի համարը, Δ -ն՝ էկստինկցիոն երկարությունը, θ_p -ն՝ Բրեգի անկյունը, z_1 -ը՝ առաջին բյուրեղի հաստությունը, z_2 -ը երկրորդ բյուրեղի հաստությունը, $\sigma_{n,n+1}$ -ը n և $n+1$ շերտերի միջև հեռավորությունն է:

Բանաձև (2)-ի արտածման ժամանակ ենթադրվում է, որ ինտերֆերաչափի ինչպես առաջին, այնպես էլ երկրորդ բյուրեղները հաստ են՝ տեղի ունի Բորմանի էֆեկտը, այսինքն նրանցում կլանվում են առաջին դաշտերը (MoK_α ճառագայթում, բյուրեղների ընդհանուր հաստությունը՝ 10մմ):

Տարբեր նյութերում խտության համասեռ բաշխվածության հետազոտման համար մեր կողմից պատրաստվել են նմուշներ սիլիցիումի բյուրեղից, քվարցից, գրաֆիտից, ալյումինիումից, տարբեր թղթերից: Նմուշների հաստությունը ինտերֆերաչափի բյուրեղների միջև տեղադրելու համար վերցվել է քիչ ավելի փոքր ($2 \cdot 10^{-2}$ սմ ($3 \cdot 10^{-2}$ սմ), քան ինտերֆերաչափի բյուրեղների հեռավորությունն է, իսկ լայնությունը կազմում էր մոտավորապես ինտերֆերաչափի բյուրեղների բարձրության կեսը, դրա համար էլ փնջերի կեսն անցնում էր փորձանմուշի միջով, իսկ մյուսը կեսը՝ շրջանցում էր փորձանմուշը, ինչպես ցույց է տրված նկ.1- ում: Նկարահանումները կատարվել են Լանգի տիպի ռենտգենատեղա-գրական խցիկով:

Նկ. 2 - ում բերված են չորս ռենտգենյան սեկցիոն տեղագրեր, որոնք բնորոշում են նյութերի հետևյալ խմբերը (220 անդրադարձում):

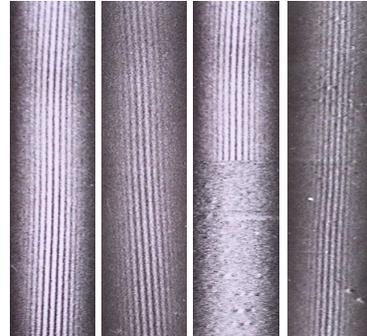
1. Ինտերֆերաչափի բյուրեղների միջև օդային բացակ է (նկ.2ա): Ստացվել է շեղման գծերի հստակ պատկերը:

2. Ինտերֆերաչափի բյուրեղների միջև տեղավորված է համասեռ խտությամբ նյութի նմուշ (սիլիցիումի, քվարցի բյուրեղական թիթեղ (նկ. 2բ)):



ա բ գ դ

Նկ. 2. Երկբյուրեղ կրկնակի ինտերֆերաչափի բյուրեղների միջև տեղադրված են տարբեր նյութերի շերտեր (220 անդրադարձում)



ա բ գ դ

Նկ. 3. Երկբյուրեղ կրկնակի ինտերֆերաչափի բյուրեղների միջև տեղադրված են տարբեր նյութերի շերտեր (220 անդրադարձում)

Ինչպես երևում է նկարից, պատկերի հստակությունը պահպանվում է (համեմատեք միմյանց հետ վերին և ներքևի մասերը), սակայն բյուրեղների միջև գտնվող միջավայրով անցնելու ժամանակ կլանման պատճառով, ներքևի մասի ինտենսիվությունը փոքր է:

3. Ինտերֆերաչափի բյուրեղների միջև տեղադրված է նյութի շերտ, որի խտությունն անհամասեռ է: Նմուշի ծավալում նյութի խտությունը, կոորդինատներից կախված արագ և պատահականորեն փոփոխվում է (թուղթ, գրաֆիտ (նկ. 2գ)): Նկարում ինտերֆերենցիոն պատկերը (նկարի ներքևի մասը) լիովին անհետանում է: Ռեֆլեքսի ինտենսիվությունը համարյա չի փոխվել (փոքր կլանում), սակայն շերտի գծերը լրիվ անհետացել են:

4. Ինտերֆերաչափի բյուրեղների միջև տեղադրված է նյութի շերտ, որի խտությունը նմուշի ծավալում փոփոխվում է պատահականորեն, բայց ոչ խիստ (նկ. 2դ): Նկարում շերտի գծերի տեսանելիությունը փոքրացել է (պատկերի հստակությունն ընկել է), սակայն դրանք երևում են (ռեֆլեքսի ներքևի մասը): Նույնանման ինտերֆերենցիոն պատկերներ ստացվել են նաև 220 անդրադարձումով (նկ.3ա - 3դ):

Այսպիսով, հանգում ենք կարևոր եզրակացության:

Փորձնականորեն ցույց է տրվել, որ վերադրվող ռենտգենյան ալիքների նրմուշների միջով նախնական անցման դեպքում, որոնց մեջ նյութի խտությունը բաշխված է անհավասարաչափ, այդ ալիքներում առաջանում են ոչ մշտական փուլային տեղաշարժեր, որի արդյունքում էլ դիտվող ինտերֆերենցիոն պատկերներն անհետանում են: Դրա հիման վրա նախագծվել, մշակվել և պատրաստվել են երկբյուրեղ կրկնակի ինտերֆերաչափեր այդպիսի հետազոտությունների համար: Հետազոտելով ինտերֆերաչափերում առաջացած շերտի գծերի ցայտունությունը՝ կարելի է գնահատել նմուշներում նյութի խտության

բաշխման համասեռության աստիճանը: Սա հատկապես կարևոր է անթափանցիկ մարմինների համասեռությունների հետազոտությունների համար:

3. Նյութերի նմուշներում եռաբյուրեղ ինտերֆերաչափով խտության բաշխման հետազոտությունների ռենտգենինտերֆերաչափական մեթոդ: Վերը նկարագրեցինք երկբյուրեղ կրկնակի ինտերֆերաչափի միջոցով նյութերի համասեռության հետազոտությունների ռենտգենաինտերֆերաչափական մեթոդը: Սակայն երկբյուրեղ ինտերֆերաչափի օգնությամբ նյութում խտության բաշխման համասեռությունը կարելի է հետազոտել միայն բարակ (10^{-2} սմ կարգի) նմուշների համար: Իրոք, մի կողմից երկբյուրեղ ինտերֆերաչափը կարող է աշխատել (նրանից ինտերֆերենցիոն պատկեր ստացվում է) միայն այն դեպքում, երբ ռենտգենյան ալիքներն առաջին բյուրեղում դիֆրակցվելով, վերադարձվում են մեկը մյուսի վրա երկրորդ բյուրեղի մուտքի մակերևույթի վրա, իսկ դա տեղի կունենա բավարար տեղամասում միայն այն դեպքում, երբ բյուրեղների միջև հեռավորությունը (չդիֆրակցվող գոտու լայնությունը) առաջին բյուրեղի հաստությունից անհամեմատ փոքր է [5, 6], սակայն մյուս կողմից՝ երկբյուրեղ ինտերֆերաչափում, ինչպես և բոլոր ռենտգենյան ինտերֆերաչափերում [7, 8], առաջին բյուրեղի հաստությունը կլանման պատճառով սահմանափակ է: Ուստի, որքան մեծ է բյուրեղների միջև եղած հեռավորությունը, այնքան փոքր է ինտերֆերենցիոն շերտերի միջև եղած հեռավորությունը, որը որոշվում է (2) բանաձևով, և հետևաբար փոքր է ինտերֆերաչափի լուծող ունակությունը: Դրա համար էլ, որպեսզի երկբյուրեղ ինտերֆերաչափն օժտված լինի բավարար լուծող ունակությամբ, բյուրեղների միջև եղած հեռավորությունը չպետք է մեծ լինի $4 \cdot 10^{-2}$ սմ-ից: Հաշվի առնելով կլանումը՝ մեր հետազոտություններում սիլիցիումի բյուրեղից պատրաստված ինտերֆերաչափի համար ((110) և $(1\bar{1}0)$ անդրադարձնող հարթություններ) բավարար լուծող ընդունակություն ստանում ենք, երբ բյուրեղների միջև հեռավորությունը $4 \cdot 10^{-2}$ սմ-ից ավելի չէ: Այն հնարավորություն է տալիս նյութերի նմուշներում հետազոտել այն խտությունների բաշխվածության համասեռության աստիճանը, որոնց հաստությունը չի գերազանցում $3 \cdot 10^{-2}$ սմ-ը:

Այսպիսով, հաստ նմուշների համասեռությունների հետազոտությունների համար անհրաժեշտ է օգտվել այնպիսի ինտերֆերաչափերից, որոնց բյուրեղների միջև եղած հեռավորությունը բավական մեծ է:

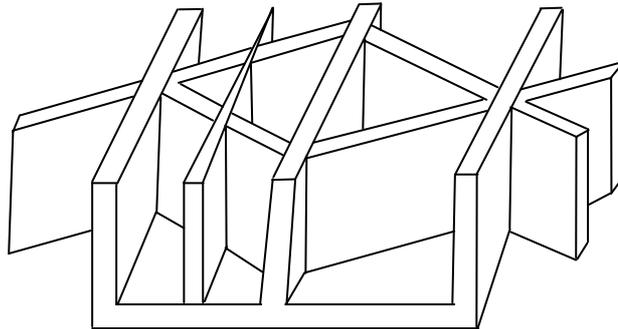
Եթե հաստ նմուշներում նյութի խտության բաշխվածության համասեռության հետազոտման համար ղեկավարվենք ինտերֆերաչափի բյուրեղների հեռավորությունների մեծացման պահանջով, ապա այդ խնդիրը հեշտ կարելի է լուծել Լաուեի տիպի եռաբյուրեղ ինտերֆերաչափի օգնությամբ: Սակայն անհրաժեշտ է նկատի ունենալ հետևյալ հանգամանքները.

1. Հետազոտվող նմուշների հաստություններն առաջին հերթին սահմանափակ են նրանով, որ հաստ նմուշների միջով ռենտգենյան ճառագայթները կլանման պատճառով չեն կարող անցնել, այնպես որ հետազոտվող նմուշների սահմանային հաստությունները որոշվում են ռենտգենյան ճառագայթման ալիքի երկարությամբ և նմուշի կլանող ունակությունով:

2. Նմուշներում նյութի խտության բաշխման անհամասեռությունը գնահատվում է ռենտգենաինտերֆերենցիոն պատկերի վրա այդ խտության անհամասեռության ազդեցությամբ: Ուստի ինտերֆերաչափի մշակման դեպքում խտության անհա-

մասեռությունների հետազոտության համար անհրաժեշտ է նկատի ունենալ, որ այդ ինտերֆերաչափը պետք է տա ինչ-որ ինտերֆերենցիոն պատկեր, որպեսզի հետազոտվի խտության անհամասեռության ազդեցությունն այդ պատկերի վրա: Այդպիսի ինտերֆերենցիոն պատկերները կարող են լինել՝ մուարի պատկերները, հավասար հաստության շերտերը, ճոճանակային շերտերը, շեղման գծերը և այլն:

Մուարի պատկերները, որոնք ստացվում են եռաբյուրեղ ինտերֆերաչափից, շատ զգայուն են ինտերֆերաչափի բյուրեղների տարբեր կառուցվածքային խանգարումների նկատմամբ: Հետևաբար դրանք բավական զգայուն են ռենտգենյան փնջի առջև բյուրեղների միջև դրված նյութի խտության անհամասեռությունների նկատմամբ, սակայն դրանում պետք է համոզվել փորձարարական հետազոտություններով:



Նկ. 4. Եռաբյուրեղ ինտերֆերաչափ, առաջին և երկրորդ բյուրեղների միջև դրված է համասեռ նյութից պատրաստված սեպ

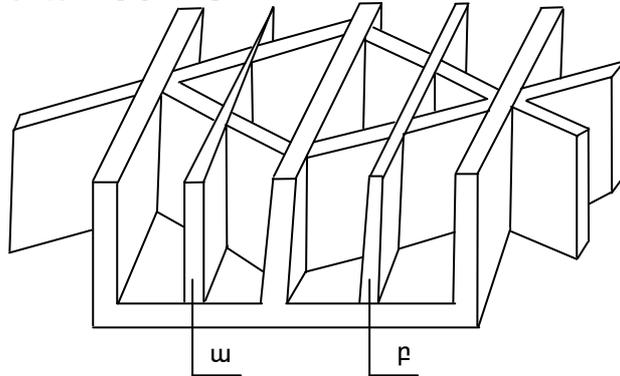
Ինտերֆերաչափի պատրաստման դեպքում դժվար է կռահել (կանխագուշակել), թե ինչպիսի մուարի պատկեր կստացվի, և ինչպես կարող են ազդել խտության անհամասեռությունները նրա վրա, ուստի մուարի պատկերների օգտագործման դեպքում խտության անհամասեռությունների հետազոտման համար, յուրաքանչյուր ինտերֆերաչափի համար անհրաժեշտ է կատարել նախնական հետազոտություններ:

Եթե ինտերֆերաչափը մուարի պատկերներ չի տալիս, ապա խտության անհամասեռությունների հետազոտությունների համար կարելի է օգտվել հավասար հաստության շերտերից: Հավասար հաստության շերտեր կարելի է ստանալ, տեղադրելով ինտերֆերաչափի առաջին և երկրորդ բյուրեղների միջև համասեռ սեպ, ինչպես ցույց է տրված նկ. 4 - ում: Հավասար հաստության շերտերի պարբերությունը (հարևան շերտերի միջև հեռավորությունը) կարելի է արտահայտել հետևյալ բանաձևով.

$$\Lambda = \frac{\lambda \cdot \operatorname{ctg} \frac{\varphi}{2}}{2\delta}, \quad (3)$$

որտեղ λ -ն ռենտգենյան ալիքի երկարությունն է, φ -ն սեպի գագաթի անկյունն է, δ -ն բեկման ցուցչի միավոր դեկրեմենտն է:

Հետազոտվող նմուշը դրվում է ինտերֆերաչափի երկրորդ և երրորդ բյուրեղների միջև, ինչպես ցույց է տրված նկ.5 - ում:

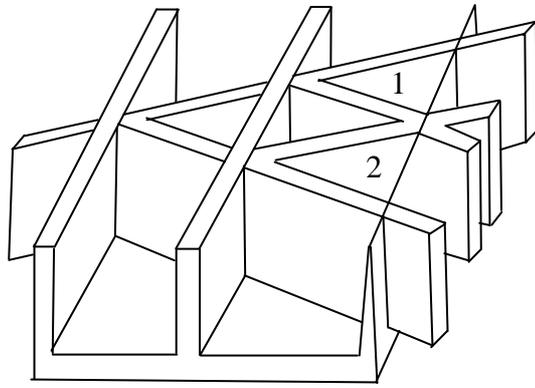


Նկ. 5. Ինտերֆերաչափի երկրորդ և երրորդ բյուրեղների միջև դրված է ա - համասեռ նյութից պատրաստված սեպ, բ - հետազոտվող նմուշը

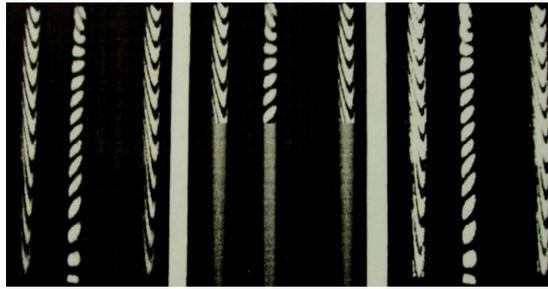
Ինչպես արդեն նշեցինք, նյութի խտության բաշխվածության անհամասեռության հետազոտման համար կարելի է օգտվել ճոճանակային էֆեկտի ինտերֆերենցիոն պատկերներից: Կարելի է պատրաստել հատուկ եռաբյուրեղ ինտերֆերաչափեր, ճոճանակային շերտերի ինտերֆերենցիայի դիտման համար, ինչպես ցույց է տրված նկ. 6 - ում: Ինչպես երևում է նկ. 6 - ից, ինտերֆերաչափի երրորդ բյուրեղը սեպաձև է, ուստի փնջերը, որոնք դուրս են գալիս երկրորդ բյուրեղից (1 և 2 փնջեր), վերադարձվելով մեկը մյուսի վրա, ինտերֆերաչափի երրորդ բյուրեղի մուտքի մակերևույթի վրա առաջացնում են ճոճանակային շերտեր: Ստացված ինտերֆերենցիոն պատկերը կարելի է օգտագործել նմուշների համասեռությունների հետազոտությունների համար: Իրոք, եթե անհամասեռ նմուշը դրվի առաջին և երկրորդ բյուրեղների կամ երկրորդ և երրորդ բյուրեղների միջև, ապա ինտերֆերենցիոն պատկերը, որը ստացվում է 1 և 2 փնջերի վերադարձնան արդյունքում, անհետանում է:

4. Նյութերի նմուշներում խտության համասեռության բաշխվածության հետազոտումը եռաբյուրեղ ինտերֆերաչափով ստացված ճոճանակային շերտերի օգնությամբ: Այժմ կսահմանափակվենք եռաբյուրեղ ինտերֆերաչափով ստացված ճոճանակային շերտերի օգնությամբ հետազոտվող նմուշներում նյութի խտության բաշխման անհամասեռությունների հետազոտության փորձարարական արդյունքների շարադրմամբ: Հետազոտությունները կատարվել են նկ. 6 - ում պատկերված ինտերֆերաչափով:

Նկ. 7- ում բերված են նյութի խտության բաշխման բնույթի հետազոտման արդյունքները տարբեր նմուշներում նկ.6 - ում ցույց տրված հատուկ պատրաստված ինտերֆերաչափի օգնությամբ: Նկ. 7ա - ում բերված է ինտերֆերաչափից ստացված ճոճանակային շերտերը: Նկ. 7բ - ում ցույց է տրված այդ ինտերֆերաչափով ստացված ինտերֆերենցիոն պատկերը, երբ ինտերֆերենցիոն ճառագայթները մինչև վերադարձվելն անցնում են թղթե նմուշի միջով (ռեֆլեքսի ներքևի մասը), իսկ նկ.7գ-ում ցույց է տրված այն պատկերը, երբ այդ ճառագայթներն անցնում են սիլիցիումի բյուրեղական նմուշի միջով:



Նկ. 6. Ճոճանակային շերտերի օգնությամբ նմուշների համասեռության հետազոտման համար կիրառվող եռաբյուրեղ ինտերֆերաչափ, որի երրորդ բյուրեղը սեպածն է



ա) բ) գ)

Նկ. 7. Ինտերֆերենցիոն պատկերներ, որոնք ստացվել են նկ. 6 - ում պատկերված ինտերֆերաչափից. ա - ինտերֆերաչափի բյուրեղների միջև օդային շերտ է, բ - ինտերֆերաչափի բյուրեղների միջև թղթի նմուշ է, գ - ինտերֆերաչափի բյուրեղների միջև սիլիցիումի բյուրեղական նմուշ է

Ինչպես երևում է բերված նկարներից, թղթե նմուշներում նյութի խտության անհամասեռ բաշխումը վերացնում է ինտերֆերենցիոն պատկերը (ներքևի մասը), իսկ սիլիցիումի բյուրեղական նմուշները միայն թուլացնում են ինտերֆերենցիոն դաշտի ընդհանուր ինտենսիվությունը: Ինտերֆերենցիոն պատկերի ցայտունությունը պահպանվում է սիլիցիումի բյուրեղային նմուշում նյութի խտության բաշխման համասեռության հետևանքով:

Այսպիսով, միջավայրով անցնող ինտերֆերենցվող ալիքների (մինչև նրանց վերադրումը) ճոճանակային շերտերի ցայտունության փոփոխությունների հետազոտությունների օգնությամբ կարելի է գնահատել այդ միջավայրում նյութի խտության բաշխման համասեռությունը:

Մշակված մեթոդները լայն կիրառություն կարող են ունենալ նյութագիտության մեջ, մասնավորապես օպտիկապես համասեռ տարրերի ստեղծման գործում, որոնք ունեն բեկման ցուցի կետից կետ աննշան փոփոխություն:

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. **Дичберн Р.** Физическая оптика. – М.: Наука, 1965.- 631 с.
2. **Борн М., Вольф Э.** Основы оптики.- М.: Наука, 1973.-712 с.
3. **Абоян А.О.** Интерференция рентгеновских лучей с учетом длительности когерентного излучения // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер.- 2007.- Т.60, № 2. - С.252-260.
4. **Абоян А.О.** Исследование рентгенодифракционных изображений несовершенств монокристаллов кремния кратными интерферометрами // Тезисы докладов III национальной конференции по применению рентгеновского, синхротронного излучений нейтронов и электронов для исследования материалов (РНСЭ-2001) / ИК РАН. – М., 2001.-С.310.
5. **Authier A.** Contrast of a stacking Fault on X-Ray Topographs // Phys. Stat. Sol.-1968. -V. 27. - P. 77-93.
6. **Безирганян П.А., Аветисян Г.Г.** Механизм возникновения полос смещения рентгеновских волн в двухблочных интерферометрах // Препринт ИГИС-3. -Ереван, 1981. -38с.
7. **Vonse U., Hart M.** An X-ray Interferometer //Appl. Phys. Letters.- 1965.- V.6. - P.155-156.
8. **Пинскер З. Г.** Динамическое рассеяние рентгеновских лучей в идеальных кристаллах. – М.: Наука, 1974.- 367с.

ՀՊՃՀ: Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն՝ 20.03.2008:

А.О. АБОЯН, Г.Р. ДРМЕЯН, Т.Н. САФАРЯН ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ОДНОРОДНОСТИ ВЕЩЕСТВ

Экспериментально показано, что при предварительном прохождении суперпозирующих рентгеновских волн через образцы, в которых плотность вещества распределена неоднородно, в этих волнах создаются нерегулярные фазовые сдвиги, в результате чего наблюдаемые интерференционные картины исчезают. Исследуя контрасты линий смещения, возникающих в двукратных двукристалльных интерферометрах, и маятниковых полос, возникающих в трехкристалльных интерферометрах, можно оценить степень однородности распределения плотности вещества в образцах.

Ключевые слова: рентгеновский интерферометр, интерференционные картины, муаровые картины, линии смещения, полосы равных толщин, маятниковые полосы, когерентные волны.

A.H. ABOYAN, H.R. DRMEYAN, T.N. SAFARYAN INTERFEROMETRIC METHODS OF INVESTIGATING THE SUBSTANCE HOMOGENEITY

It has been shown experimentally that at preliminary passing of the superpositioning X-ray waves through the samples in which the density of the substance is distributed inhomogeneously, irregular shifts of phases arise in those waves as a result of which the observed interference patterns disappear. While investigating the contrasts of the line shifts arising in the double two-crystal interferometers and the pendulum strips arising in the three-crystal interferometers, it is possible to estimate the degree of homogeneity of the substance density distribution in the samples.

Keywords: X-ray interferometer, interference patterns, moire patterns, shift lines, strips of equal thicknesses, pendulum strips, coherent waves.

Վ.Հ. ՄԱՐՏԻՐՈՍՅԱՆ, Գ.Հ. ԹՈՐՈՍՅԱՆ, Ժ.Հ. ՂՈՒԿԱՍՅԱՆ, Ա.Հ. ԶԻՏԱՆՅԱՆ, Մ.Է. ՄԱՍՈՒՆՑՅԱՆ

ՖԵՐՈՍԻԼԻՑԻՈՒՄԻ ՍՏԱՅՈՒՄԸ ՄԵՏԱԼՈՒՐԳԻԱԿԱՆ ԳՈՐԾԱՐԱՆՆԵՐԻ ԹԱՓՈՆԱՆԱՐԱՄՆԵՐԻՑ

Քննարկվում է պղնձաձուլական գործարանի թափոնակույտային խարամների և մոլիբդենային արտադրության թափոնների համատեղ այլումինաթերմային վերականգնման գործընթացը ֆերոսիլիցիումի ստացման նպատակով: Ցույց է տրված, որ թափոնակույտային և մոլիբդենային խարամների որոշակի հարաբերության, ինչպես նաև վերականգնիչի, CaO-ի և NaNO₃-ի լավարկված պայմաններում ստացվում է ֆերոսիլիցիում (FeSi) արժեքավոր համաձուլվածքը: Ռենտգենաֆազային և քիմիական վերլուծության տվյալներով հաստատվել են ստացված արդյունքները:

Առանցքային բաներ. այլումինաթերմիա, վերականգնում, թափոն, ֆերոսիլիցիում, համաձուլվածք, մոլիբդեն:

Հանքահումքային հարստության լիակատար և անթափոն օգտագործումը հանրապետության գիտատեխնիկական ծրագրերի գերակա ուղղություններից է: Տեխնոլոգիական նշանակությունից բացի այս խնդիրը լուծում է նաև թափոնների օգտագործման հետ կապված բնապահպանական հարցեր: Դա առաջին հերթին վերաբերում է մեր հանրապետությունում գործող արտադրությունների թափոններից երկաթի և սիլիցիումի կորզմանը:

Ֆերոսիլիցիումը երկաթից և սիլիցիումից բաղկացած համաձուլվածք է, որում սիլիցիումի քանակը կարող է տատանվել 10...90%՝ կախված համաձուլվածքի տեսակից: Այն լայնորեն կիրառվում է պողպատի արտադրության մեջ՝ թթվածնազտման և լեգիրման գործընթացներում, իսկ որոշ դեպքերում՝ պողպատի կառուցվածքի բարելավման նպատակով:

Գունավոր մետաղների մետալուրգիայում ֆերոսիլիցիումը կիրառվում է մի շարք հատուկ նշանակության համաձուլվածքների արտադրությունում (ֆերոմոլիբդեն, ֆերոտիտան և այլն): Միլիցիումի բարձր պարունակությամբ ֆերոսիլիցիումը (45...75%) ստացվում է 7500...16500 կՎտ հզորությամբ աղեղնային էլեկտրավառաններում, որոնք պատված են ածխածնային հրակայուն աղյուսով, որպես ելանյութ օգտագործելով կվարցիտ, կոքս և երկաթի տաշեղներ: Պետք է նշել, որ ֆերոսիլիցիումի արտադրությունը ամենաէներգատար և թանկ մետալուրգիական արտադրություններից մեկն է: 1 տ 75% ֆերոսիլիցիումի արտադրության վրա ծախսվում է 8500 կվ/ժ էլեկտրաէներգիա: 1 տ պատրաստի արտադրանքի արժեքը 1000...1200 ԱՄՆ դոլար է: Այսօր մեր հանրապետությունում ֆերոհամաձուլվածքներ արտադրող երկու խոշոր գործարանները՝ «Մաքուր Երկաթ» և «Արմենիան Մոլիբդեն Փրոդաքշն», որպես վերականգնիչ օգտագործում են ֆերոսիլիցիում, որը ներկրվում է դրսից: Հաշվի առնելով տեղափոխման դժվարությունները և ֆերոսիլիցիումի բարձր ինքնարժեքը, նպատակ է դրվում այն ստանալ էժան հումքից և այլընտրանքային արդյունավետ տեխնոլոգիայով: Որպես էժան հումք կարելի է օգտագործել «Մաքուր Երկաթ» գործարանի մոլիբդենային և Ալավերդու պղնձաձուլական գործարանի

թափոնները: Այդ հարցի տնտեսական մեծ արդյունավետությունը երևում է նշված խարամների քիմիական վերլուծության տվյալներից (աղ.1):

Աղյուսակ 1

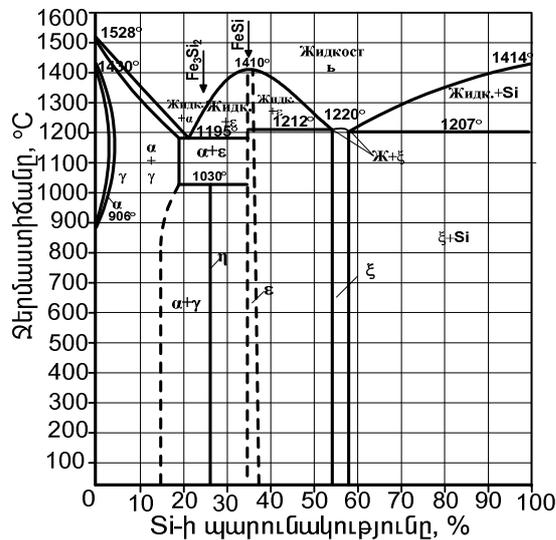
Խարամների քիմիական վերլուծության տվյալները

Խարամի տեսակը	Պարունակությունը, %										
	Cu	S	SiO ₂	CaO	FeO	Al ₂ O ₃	Zn	Pb	Au	Ag	Mo
Թափոնակույտային	0,75	1,85	30,11	1,67	49,31	11,54	0,45	0,52	0,23 գ/տ	6,75 գ/տ	-
Մոլիբդենային	-	-	89,00	-	0,30	10,70	-	-	-	-	0.3

Ինչպես երևում է աղյուսակի տվյալներից, թափոնակույտային խարամները հարուստ են երկաթով և սիլիցիումով, իսկ մոլիբդենային խարամները՝ սիլիցիումով:

Աշխատանքի նպատակն է՝ հետազոտել հանրապետության համար չափազանց կարևոր ֆերոսիլիցիումի ստացման գործընթացը՝ Ալավերդու պղնձածուլական գործարանի թափոնակույտային և «Մաքուր երկաթ» գործարանի մոլիբդենային խարամների համատեղ ալյումինաթերմային վերականգնման եղանակով:

Ինչպես երևում է Fe-Si վիճակի դիագրամից (նկ. 1), Fe-ը Si-ի հետ կարող է առաջացնել երեք տիպի միացություններ. մոնոսիլիցիդ FeSi (33,3% Si); (- ֆազ Fe₃Si₂ (25% Si); ε՝ ֆազ Fe₂Si₅ (55,68% Si): Այս միացություններից ամենակայունը FeSi-ն է: Մյուսները բարձր ջերմաստիճանում քայքայվում են՝ առաջացնելով Fe և Si:



Նկ.1. Fe-Si վիճակի դիագրամը

Դիագրամից երևում է նաև, որ FeSi համակարգն ունի երեք էվտեկտիկա առաջինը 20% Si-ի պարունակությամբ, 1195(C հալման ջերմաստիճանով, երկրորդը՝ 51% Si-ի պարունակությամբ, 1212(C հալման ջերմաստիճանով և երրորդը՝ 59% Si-ի պարունակությամբ, 1207(C հալման ջերմաստիճանով: Ֆերոսիլիցիումի ստանդարտ բաղադրությամբ համաձուլվածքների հալման ջերմաստիճանը չի գերազանցում 1330(C: Ելնելով համաձուլվածքի հալման ջերմաստիճանից՝ կարելի է որոշել նրա բաղադրությունը. այսպես, 43...50% Si պարունակող համաձուլվածքը հալվում է 1220...1380(C-ում, 70...78% Si պարունակող համաձուլվածքը՝ 1300...1330°C-ում:

Կախված Fe-ի և Si-ի քանակներից՝ փոխվում է նաև համաձուլվածքի տեսակարար կշիռը, ինչը կիրառվում է համաձուլվածքում Si-ի քանակն արագ որոշելու համար (աղ. 2):

Աղյուսակ 2

Համաձուլվածքի խտության և նրանում առկա սիլիցիումի պարունակության կապը

Si-ի պարունակ. %	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90
Համաձուլվածքի տեսակարար կշիռը, գ/սմ ³	5,61	5,15	4,75	4,37	4,00	3,76	5,31	3,27	3,03	2,78	2,55

Միներալոգիական վերլուծության տվյալները հաստատում են, որ Ալավերդու թափոնակույտային խարամներում հիմնական միներալներն են ֆայալիտը (FeSiO₃ կամ 2FeO.SiO₂)՝ ~ 70(39)% և մագնետիտը՝ 19(6-8)%-ից (երկաթի ընդհանուր քանակը 37,8 գ է, իսկ Si-ի քանակը՝ 55,73 գ: Այս խարամները հետագայում կարող են օգտագործվել որպես արժեքավոր հուսք ֆերոսիլիցիումի արտադրության համար:

Ֆերոսիլիցիումի ստացման ժամանակակից եղանակ է համարվում այլումինաթերմային վերականգնման եղանակը, որը թույլ է տալիս շրջանցել ամենակարևոր արտադրական հարցը՝ գերբարձր պարունակությամբ խտանյութերի կիրառումը: Այս եղանակով բարձր ջերմաստիճանների պայմաններում վերականգնվում և հալվում են միայն համաձուլվածքը կազմող մետաղները (այս դեպքում՝ երկաթը և սիլիցիումը), իսկ մնացած խառնուրդները մասնակցում են սիլիկատագոյացման գործընթացներին [1...3]:

Երկաթի և սիլիցիումի օքսիդների՝ այլումինով վերականգնման ռեակցիան խիստ ջերմանջատիչ է, ինչը թույլ է տալիս այդ մետաղները վերականգնել առանց էլեկտրաէներգիայի ծախսի, այսինքն՝ անվառարան (հորանային տիպի չտաքացվող վառարանում): Բարձր ջերմաստիճանների (2000...2500°C) ապահովումն առանց լրացուցիչ ջերմության աղբյուրի, տեխնոլոգիական գործընթացների պարզությունը (բարդ սարքավորումների բացակայությունը) և գազային արտանետումների բացակայությունն այս եղանակը դարձնում են մրցունակ՝ ավանդական եղանակների հետ համեմատած:

Մինչ այլումինաթերմային գործընթացի փորձագիտական հետազոտությունը կատարվել է թերմոդինամիկական հաշվարկ (նկ.2):

Բերված են Գիբսի էներգիաների փոփոխության արժեքները՝ կախված ջերմաստիճանից՝ ֆայալիտի և մագնետիտի այլումինաթերմային վերականգնման ռեակցիաների համար՝ 2000...2500 K ջերմաստիճանային տիրույթում: Հաշվարկներում հաշվի են առնվել նաև ֆազային փոխարկումները՝ էնթալպիայի և էնտրոպիայի արժեքներում: Ըստ դիագրամի

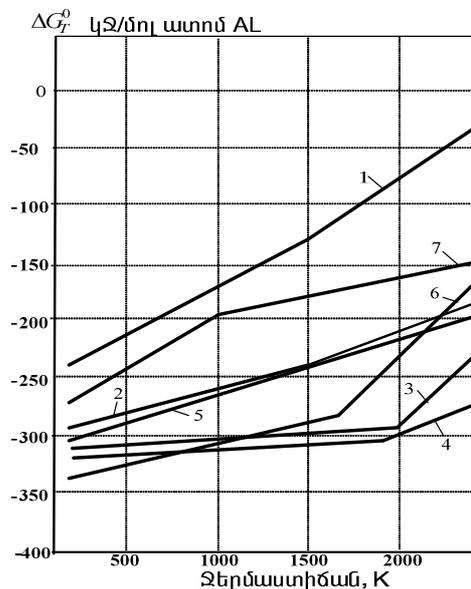
տվյալների՝ երկաթի և սիլիցիումի օքսիդների այլումինաթերմային վերականգնման արդյունքում կարող են առաջանալ FeSi, Fe₃Si և Fe₂Si₃, այդ պատճառով թերմոդինամիկական հաշվարկները կատարվել են այն ռեակցիաների համար, որոնք ուղեկցվում են այդ նյութերի ստացումով:

Ինչպես երևում է նկարից, նշված բոլոր ռեակցիաները թերմոդինամիկորեն ընթացող են և ունեն ΔG_T^0 -ի բավականին ցածր բացասական արժեքներ (-50...-350 կՋ/մոլ), սակայն առավել հավանական են 2, 3, և 4 ռեակցիաները, որոնք ընթանում են FeSi-ի առաջացմամբ: Դա թույլ է տալիս եզրակացնել, որ բարձր ջերմաստիճաններում հավանական է FeSi համաձուլվածքի ստացումը:

Փորձարարական աշխատանքների համար որպես վերականգնիչ օգտագործվել են այլումինի փոշի՝ հետևյալ բաղադրությամբ՝ 98,5%Al, 0,5% Fe, 0,25%Si, և երկաթի տաշեղներ, ինչպես նաև քիմիապես մաքուր CaO, նատրիումի նիտրատ և CaF₂: Ըստ աղյուսակային տվյալների (աղ.1) 100 գ թափոնակույտային խարամում երկաթը կազմում է 37,8 գ, իսկ նույն քանակի մոլիբդենային խտանյութում և թափոնակույտային խարամում Si-ը կազմում է 55,73 գ: Առավելագույն կորզման աստիճանի դեպքում համաձուլվածքը կպարունակի 40,4% Fe և 59,6% Si:

Բովախառնուրդի կազմում ընդգրկվել են նաև երկաթի տաշեղներ: Այս գործընթացի էությունն այն է, որ սիլիցիումի երկօքսիդը վերականգնվում է այլումինով՝ երկաթի առկայությամբ: Վերականգնված սիլիցիումն անընդհատ լուծվում է երկաթի մեջ և հեռանում ռեակցիոն տիրույթից՝ ռեակցիայի հավասարակշռությունը տեղաշարժելով դեպի սիլիցիումի վերականգնում:

Բովախառնուրդի սկզբնական բաղադրությունը հետևյալն է. թափոնակույտային խարամ՝ 100 գ, մոլիբդենային խարամ՝ 100 գ, երկաթի տաշեղներ՝ 17 գ, այլումինի փոշի 60 գ:

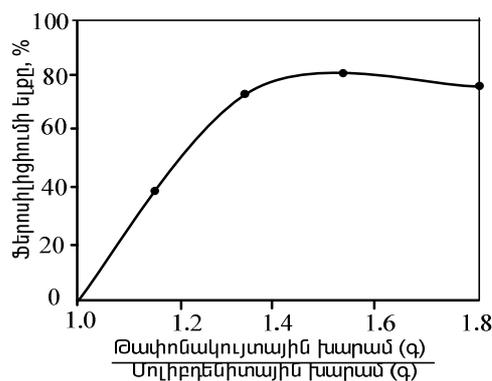


Նկ. 2. Գիբսի էներգիայի փոփոխությունը՝ կախված ջերմաստիճանից, հետևյալ ռեակցիաների համար

- 1) $\frac{1}{2}\text{FeOSiO}_2 + \text{Al} = \frac{1}{2}\text{Fe} + \frac{1}{2}\text{Si} + \frac{1}{2}\text{Al}_2\text{O}_3$,
- 2) $\frac{1}{2}\text{FeOSiO}_2 + \text{Al} = \frac{1}{2}\text{FeSi} + \frac{1}{2}\text{Al}_2\text{O}_3$,
- 3) $\frac{3}{8}\text{Fe}_2\text{SiO}_4 + \text{Al} = \frac{3}{8}\text{FeSi} + \frac{1}{2}\text{Al}_2\text{O}_3 + \frac{3}{8}\text{Fe}$,
- 4) $\frac{3}{20}\text{Fe}_3\text{O}_4 + \frac{9}{20}\text{SiO}_2 + \text{Al} = \frac{9}{20}\text{FeSi} + \frac{1}{2}\text{Al}_2\text{O}_3$,
- 5) $\frac{3}{8}\text{Fe}_2\text{SiO}_4 + \text{Al} = \frac{1}{4}\text{Fe}_3\text{Si} + \frac{1}{2}\text{Al}_2\text{O}_3$,
- 6) $\frac{1}{4}\text{Fe}_3\text{O}_4 + \frac{1}{4}\text{SiO}_2 + \text{Al} = \frac{1}{4}\text{Fe}_3\text{Si} + \frac{1}{2}\text{Al}_2\text{O}_3$,
- 7) $\frac{1}{2}\text{FeOSiO}_2 + \text{Al} + \frac{1}{4}\text{Fe} = \frac{1}{4}\text{Fe}_3\text{Si}_2 + \frac{1}{2}\text{Al}_2\text{O}_3$:

Փորձերը կատարվել են հետևյալ ձևով. բովախառնուրդը հավասարաչափ խառնելուց հետո տեղավորվել է ավազի վանայում արված փոսի մեջ, նմուշի կենտրոնում կոնական անցք է արվել և լցվել հարուցիչ՝ $\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{C}$ փոշեխառնուրդ: Այրումը կատարվել է շիկացած մետաղալարի օգնությամբ: Այս պայմաններում խառնուրդի մակերեսային շերտում գրգռվում է քիմիական ռեակցիա և ձևավորվում այրման ալիք, որը հաստատուն արագությամբ տարածվում է ողջ նմուշի երկարությամբ՝ առաջացնելով ինքնատարածվող բարձրաջերմաստիճան սինթեզ: Այրումը տևում է 10...12 րոպե, առավելագույն ջերմաստիճանը՝ 2300...2500 K: Այրման արդյունքում ստացված արգասիքները սառելուց հետո մետաղական և խարամային ֆազերն են ներկայացնում: Ընդ որում՝ մետաղական զանգվածը մեծ հոծ գունդ է, որը հավաքվում է խարամի հատակին և հեշտությամբ պոկվում դրանից: Մետաղական զանգվածը և խարամը կշռելուց հետո ենթարկվել են քիմիական և ռենտգենաֆազային վերլուծության:

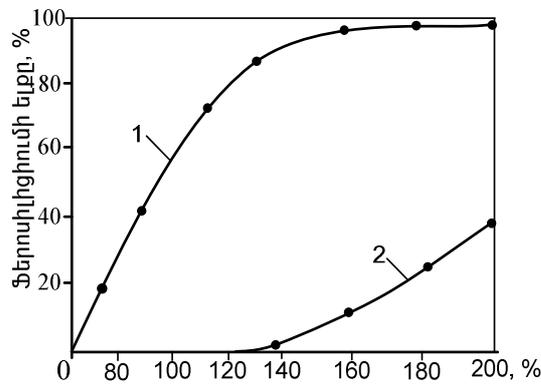
Առաջին խմբաքանակի աշխատանքներում ուսումնասիրվել է ֆերոսիլիցիումի ելքի կախումը թափոնակույտային և մոլիբդենային խարամների հարաբերությունից:



Նկ.3. Ֆերոսիլիցիումի ելքը՝ կախված խարամների հարաբերությունից

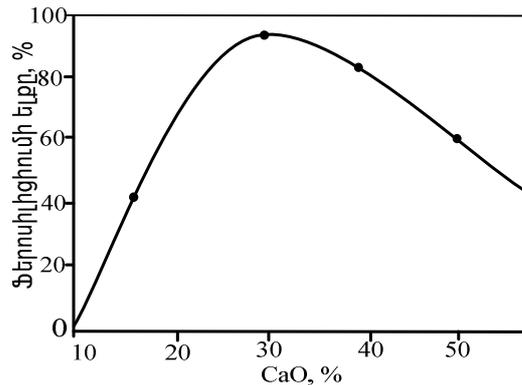
Ինչպես երևում է նկար 3-ից, ֆերոսիլիցիումի կորզման աստիճանն առավելագույն արժեքին (85.5%) հասնում է 1:5 հարաբերության դեպքում:

Ուսումնասիրվել է նաև ֆերոսիլիցիումի ելքի կախումը վերականգնիչի քանակից: Ինչպես երևում է նկար 4-ից, Al-ի՝ տեսականորեն անհրաժեշտ քանակից (65 գ) 130 % ավելցուկի դեպքում ֆերոսիլիցիումի կորզման աստիճանն առավելագույնն է և կազմում է 92%: Վերականգնիչի քանակի հետագա ավելացումը հանգեցնում է մետաղի ելքի մեծացման, սակայն այս դեպքում աճում է այլումինի քանակը համաձուլվածքում և տեսականորեն անհրաժեշտ քանակից 120 % ավելցուկի դեպքում հասնում առավելագույն արժեքին՝ մինչև 40%: Այդ պայմաններում ստացվում է հետևյալ բաղադրությամբ ֆերոսիլիկոալյումինում՝ (Fe-Si-Al). 40%Al, 10%Si, 50%Fe: Այսպիսի համաձուլվածքը մեծ կիրառություն ունի հատկապես պողպատի թթվածնագտման գործընթացում:



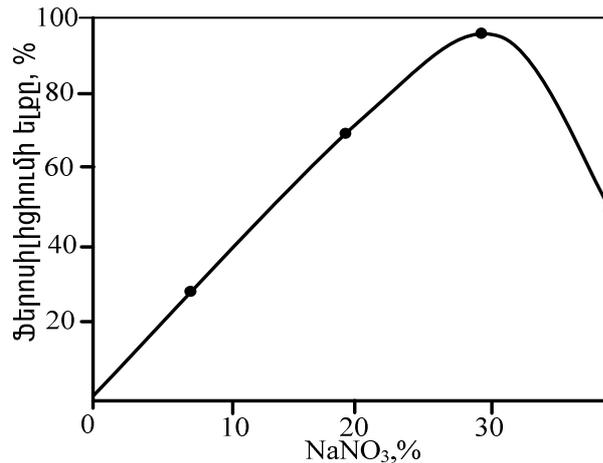
Նկ. 4. Վերականգնիչի քանակն ըստ տեսականորեն անհրաժեշտ քանակի, %՝ խարամների 1:5 հարաբերության պայմաններում (1): Ստացված մետաղական ֆազում այլումինի քանակը (2)

Ուսումնասիրվել է նաև մետաղի ելքի կախումը CaO-ի լավարկված քանակից (նկ. 5): Այս դեպքում ֆերոսիլիցիումի ելքն իր առավելագույն արժեքին է հասնում CaO-ի 30%՝ ըստ բովախառնուրդի ավելցուկի, որն ապահովում է 96% մետաղի ելք: CaO-ի հետագա ավելացման դեպքում մետաղի ելքը նվազում է:



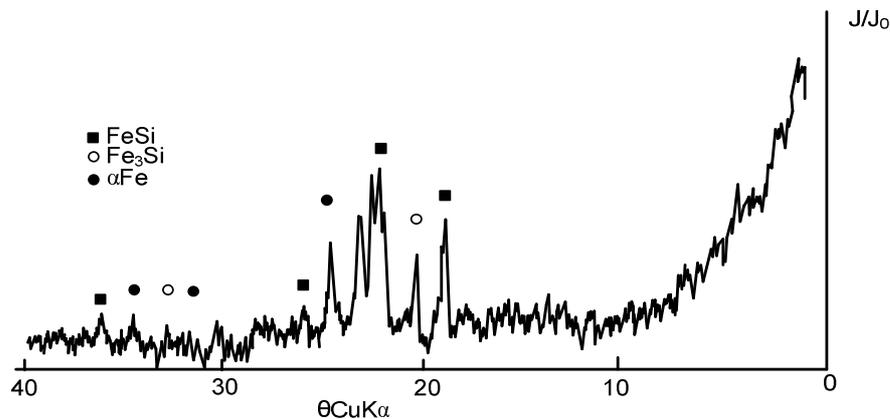
Նկ.5. Ֆերոսիլիցիումի ելքի կախումը CaO-ի քանակից՝ խարամների 1:5 հարաբերության և Al-ի 65գ պայմաններում: CaO-ի % -ը որոշվում է ըստ բովախառնուրդի կշռի

Ուսումնասիրվել է ֆերոսիլիցիումի ելքի կախումը NaNO_3 -ի քանակից (նկ.6): Վերջինս մեծացնում է բովախառնուրդի թերմիկությունը, ինչը հանգեցնում է մետաղի կորզման աստիճանի մեծացման: Մինչև 30% (ըստ բովախառնուրդի կշռի), NaNO_3 -ի ավելացնելիս ֆերոսիլիցումի կորզման աստիճանը հասնում է իր առավելագույն արժեքին՝ 98,6%: NaNO_3 -ի ավելի մեծ քանակների դեպքում ֆերոսիլիցիումի ելքը նվազում է՝ կապված մետաղի ցայտումների հետ:



Նկ.6. ֆերոսիլիցիումի ելքի կախումը NaNO_3 -ի քանակից՝ խարամների 1:5 հարաբերության և Al-ի 65գ պայմաններում

Այլումինաթերմային վերականգնման գործընթացում բովախառնուրդի հեղուկահոսունությունը մեծացնելու նպատակով ավելացվում է նաև CaF_2 ՝ բովախառնուրդի 5%-ի չափով: Այսպիսով բովախառնուրդի լավարկված պայմաններն են խարամների 1:5 հարաբերությունը, այլումինի փոշի, CaO -ի և NaNO_3 -ի 30% և CaF_2 -ի 5% (ըստ բովախառնուրդի կշռի) քանակները (բովախառնուրդի մանրացման աստիճանը՝ 85%, ֆրակցիան $-0,063$ մմ չափերի): Այդ պայմաններում ստացվում է ֆերոսիլիցիում՝ 40% Si և 60% Fe քիմիական բաղադրությամբ, առանց այլումինի հետքերի: Ստացված ֆերոսիլիցիումը ենթարկվել է նաև ռենտգենաֆազային վերլուծության: Ինչպես երևում է ռենտգենագրերից (նկ. 7), մետաղական ֆազը բաղկացած է հետևյալ ռեֆլեքսներից. FeSi (2,00; 1,82; 1,19 θ ժ), և Fe (2,03; 1,17; 1,43 θ ժ): Այն համապատասխանում է ֆերոսիլիցիումին՝ Fe-Si բանաձևով:



Նկ. 7. Պղնձաձուլական գործարանի թափոնակույտային և մոլիբդենային խարամներից ստացված մետաղական ֆազի ռենտգենագիրը

Ստացված ֆերոսիլիցիումի տեսակարար կշիռը կազմել է $5,6 \text{ g/wt}^{\text{P}}$, որն իրոք համապատասխանում է մոնոսիլիցիդի (FeSi) բաղադրությանը, իսկ հալման ջերմաստիճանը կազմել է 1330°C :

Այսպիսով, վերլուծության արդյունքները հաստատում են [4], որ փորձնականորեն հնարավոր է պղնձաձուլական գործարանի թափոնակույտային և մոլիբդենային խարամների համատեղ այլումինաթերմային վերականգնման եղանակով, որոշակի պայմաններում ստանալ արժեքավոր ֆերոսիլիցիում՝ միաժամանակ լուծելով բնապահպանական հարցեր:

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Плинер Ю.Л., Сучильников С.И., Рубинштейн Е.А.** Аллюминотермическое производство ферросплавов и лигатур.- М., 1963. - 173 с.
2. **Елютин В.П., Павлов Ю.А., Левин Б.Е., Алексеев Е.М.** Производство ферросплавов // Электрометаллургия.- М., 1957.- 436 с.
3. Технология вторичных цветных металлов / Под ред. д.т.н. **И.Ф. Худякова.** - М.: Металлургия, 1981. - С. 276.
4. **Մ արտիրոսյան Վ., Սասաունցյան Մ., Ղուկասյան Ճ., Շմավոնյան Մ., Աղամյան Տ.** Արտոնագիր N 1836 A2. - 15.09.2006:
5. ՀՊՃՀ. Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 31.08.2007:

В.А. МАРТИРОСЯН, Г.О. ТОРОСЯН, Ж.Г. ГУКАСЯН, А.Г. ЧИТАНЯН,
М.Э. САСУНЦЯН

ПОЛУЧЕНИЕ ФЕРРОСИЛИЦИЯ ИЗ ОТХОДОВ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИХ ЗАВОДОВ

Рассматривается процесс совместного алюминотермического восстановления отходов медеплавильных и молибденовых заводов с целью получения ферросилиция. Показано, что при определенных соотношениях отходов медных и молибденовых заводов, а также оптимальных условиях количеств CaO и NaNO₃ получается ценный сплав ферросилиция (FeSi). Данные рентгенофазового и химического анализа подтверждают полученные результаты.

Ключевые слова: алюминотермия, восстановление, отходы, ферросилиций, сплав, молибден.

V.H. MARTIROSYAN, G.H. TOROSYAN, Zh.H. GHOOKASYAN,
A.H. CHITANYAN, M.E. SASUNTSYAN

OBTAINING FERROSILICIUM FROM METALLURGICAL PLANT WASTES

Joint aluminium-thermal reductions of copper melting and molybdenum plant wastes for obtaining ferrosilicium are discussed. It is shown that under certain relationships of copper and molybdenum plant wastes as well as optimal quantity of CaO and NaNO₃, a valuable alloy of ferrosilicium (FeSi) is obtained. Data of X-ray and chemical analyses confirm the results obtained.

Keywords: aluminium therapy, reduction, wastes, ferrosilicium, alloy, molybdenum.

Д.А. ГЕОДАКЯН

ПЛЕНОЧНЫЕ ЭЛЕКТРОНАГРЕВАТЕЛИ

I. ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ И КОНСТРУКЦИОННЫЕ ОСОБЕННОСТИ (ОБЗОР)

Приведены функциональные и конструкционные особенности пленочных электронагревательных приборов. Проведен обзор литературных источников по конструкциям, составам и технологиям изготовления отдельных узлов и нагревателей в целом, предназначенных для различного применения.

Ключевые слова: нагреватель, пленочный, электрический, устройство, подложка, резистивный элемент, защитное покрытие.

С 70 -х годов прошлого столетия наблюдается устойчивая тенденция замены существующей протяжной элементной базы электронагревательных приборов (трубчатые электронагреватели, спирали, нагревательные стержни и провода) поверхностно-распределенными резистивными элементами, выполненными из металлов, композиционных или полупроводниковых материалов.

Основным требованием, предъявляемым к нагревательным устройствам любого типа, является обеспечение по возможности равномерного распределения температуры по нагреваемой поверхности и постоянного теплового потока на контактной поверхности теплообмена.

Главным недостатком нагревательных приборов с протяженными функциональными элементами является противоречие между низкой температурой обогреваемой среды и высокой температурой электронагревательных элементов. В современных приборах эта проблема решается применением промежуточных теплоносителей (вода, воздух, масло), увеличением теплопередающих твердых массивов или применением инфракрасного излучения. Однако все это понижает тепловой КПД, увеличивает инерционность, уменьшает срок службы и повышает стоимость тепловых агрегатов.

В нагревательных устройствах с поверхностно-распределенными резистивными элементами, обычно называемыми пленочными электронагревателями (ПЭН), резистивный элемент в виде сплошной тонкой пленки или определенного узора равномерно покрывает почти всю поверхность устройства, полностью снимая противоречия и обусловленные ими недостатки нагревательных устройств с протяженными элементами. Равномерное распределение резистивного элемента и минимальная разница между температурами нагреваемой поверхности и окружающей среды исключают необходимость использования дополнительных устройств для теплообмена с окружающей средой и обуславливают основные преимущества ПЭН: универсальность, равномерное распределение теплового потока на контактной поверхности теплообмена, безынерционность, возможность саморегулирования тепловой мощности, увеличение КПД, пожаро,-ожого,-электробезопасность, возможность использования сравнительно недорогих и доступных материалов, отсутствие вредного

воздействия нагревательного элемента на окружающую среду, например, высушивание и ионизация воздуха и т.д.

Сведения о ПЭН впервые появились с середины 70 -х годов прошлого столетия в виде патентов [1-4], число которых с каждым годом увеличивалось. Формально эти сведения можно классифицировать по конструкциям, материалам составных частей, способам изготовления, степени защищенности функциональных узлов от воздействия окружающей среды, рабочей температуре и способности изменения формы ПЭН.

Основными конструкционными элементами ПЭН являются: подложка, выполненная из тонколистового диэлектрического материала или из металлического листа с электроизоляционным покрытием; резистивный электронагревательный функциональный элемент, выполненный в виде тонкой сплошной или узорчатой пленки; защитная оболочка, выполненная в виде тонкослойной газонепроницаемой изоляции; контактные электроды, которые через токоподводы подсоединяются к сети электрического тока (рис. 1).

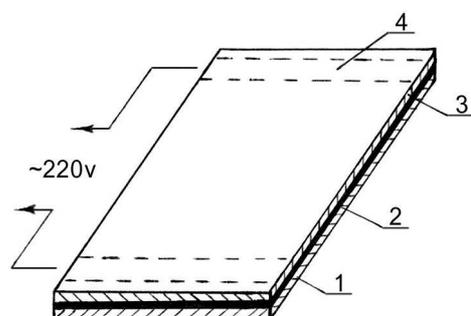


Рис. 1. Классическая модель ПЭН

- 1 - несущий электроизоляционный слой (подложка);
- 2 - резистивный электронагревательный элемент;
- 3 - защитный электроизоляционный слой;
- 4 - контактные электроды

Топологическая модель расположения нагревательного элемента описанной конструкции называется классической моделью [1]. На базе разновидностей классической модели, отличающихся между собой материалами, формами и размерами конструкционных элементов, их расположением относительно друг друга, а также числом резистивных нагревательных элементов, созданы электронагревательные устройства для нагрева жидких термолabileльных сред, напольные электронагреватели, панельные электроконвекторы, кухонные электроприборы, стационарные, передвижные или подвесные обогреватели жилых, общественных и промышленных помещений, элементы для сушильных шкафов, камер и боксов, калориферы, вентиляторы, технологические тепловые агрегаты и т.д. [1, 2, проспекты фирм “Синион”, “Спецмаш” и “Экос”, РФ].

Из разновидностей классической модели особо следует отметить модели с двумя и более резистивными элементами, выполненными из материалов с противоположным знаком температурного коэффициента электрического сопротивления (ТКЭС) [3, 4]. Благодаря параллельному включению таких элементов в электрическую цепь обеспечивается постоянство общего сопротивления элемента, что обеспечивает экономию электроэнергии и долговечность прибора.

Нагревательные устройства с классической топологической моделью расположения функциональных элементов по регулированию электрической мощности относятся к приборам с принудительным регулированием. Они могут развивать температуру от 25 до 2500 °С.

По возможности изменения геометрической формы они могут быть как “жесткими”, так и “гибкими”, по степени защищенности резистивного элемента от воздействия окружающей среды – как “открытыми”, так и “закрытыми” [5].

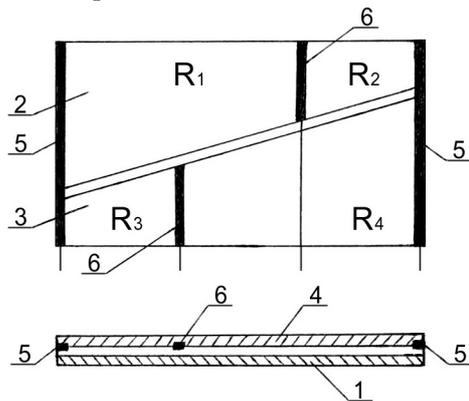


Рис. 2. Топологическая модель ПЭН с саморегулированием
1 - подложка; 2, 3 - резистивные элементы; 4 - защитное покрытие;
5, 6 - токоподводы

Известна также топологическая модель расположения функциональных элементов, обеспечивающая саморегулирование температуры ПЭН (рис. 2) [6]. В этой модели нагревательные элементы 2 и 3 выполнены в виде встречно уложенных на диэлектрическую подложку двух полос резистивной пленки переменной ширины. Основные токоподводы (Т) 5 размещены по краям пленки, а дополнительные (Т) 6 установлены на каждой из полос и делят их на участки с одинаковым сопротивлением. Устройство работает аналогично измерительному мосту (рис. 3), плечами которого являются сопротивления четырех участков резистивной пленки, изменяющейся в зависимости от температуры.

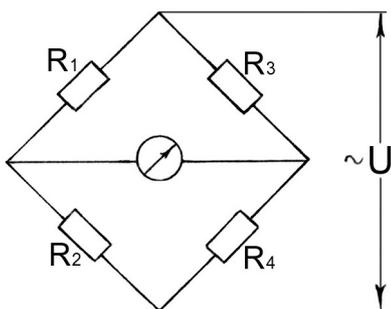


Рис. 3. Схема подключения резистивных элементов

Разбаланс такого моста пропорционален абсолютному значению ТКЭС пленки и значительно возрастает, когда участки резистивной пленки 1, 4 (R_1 , R_4) и 2, 3 (R_2 , R_3) выполнены из материалов с противоположным знаком ТКЭС.

Подложка как в описанной схеме, так и в приборах классической модели может быть выполнена из достаточно прочного и теплопроводящего материала, обеспечивающего целостность конструкции при минимальной инерционности в рабочей области температур. Такими материалами являются тонкие каменные, керамические, стеклянные и ситалловые листы, покрытые стеклоэмалью или другим электроизоляционным слоем, металлические листы толщиной 0,5...0,8 мм, электротехнический картон, асбест, пластмасса и резина [1, 5, проспекты фирм “Синион”, “Спецмаш” и “Экос”, РФ]. При этом несущая подложка может быть сформирована как предварительно, так и после сборки нагревателя путем совместной термообработки. Предлагаются также многослойные подложки, например, состоящие из двуоксида кремния, нитрида кремния или их смесей с добавками кремния в качестве теплопроводящей фазы [7]. В другой работе [8] тонкие стеклянные листы соединяются между собой кремнеорганическим эластомером, образуя термостойкую и ударопрочную подложку. Подложку с такими же свойствами получают склеиванием между собой стеклотканевых заготовок, пропитанных терморезистивной силиконовой смолой [9].

Острумное решение формования многослойного корпуса (основание + крышка) ПЭН нашли авторы работы [10]. Они предлагают корпус, состоящий из не менее трех чередующихся слоев тугоплавкого оксида и тугоплавкого металла, причем толщина слоя металла составляет от 0,2 до 2 -х толщин оксидного слоя. Благодаря чередованию оксидных и металлических слоев корпус приобретает газонепроницаемость, высокую устойчивость в окислительной среде, высокую теплопроводность и высокие механические свойства, в том числе ударопрочность и термостойкость. Резистивный элемент из тугоплавкого материала, заключенный в такой корпус, благодаря перечисленному сочетанию свойств за считанные минуты может развить температуру до 2300...2500 °С.

Из-за сравнительно низкой термостойкости органические материалы, стекла и ситаллы непригодны для изготовления подложек или корпусов ПЭН с рабочей температурой выше 1000...1200 °С. Для этой цели непригодны также нежаропрочные или окисляющиеся на воздухе металлы и сплавы. Многие керамические материалы, в том числе оксиды и силикаты Mg, Ca, Sr, Al, Zr, обладают достаточной устойчивостью и диэлектрическими свойствами при высоких температурах и после обжига обеспечивают защищенность резистивных элементов от воздействия окружающей среды. К сожалению, все они, из-за сравнительно невысокой термостойкости, не могут быть использованы в ПЭН с рабочей температурой выше 800...1000 °С.

Повышение термостойкости керамических материалов является важнейшей задачей, обусловленной не только требованиями ПЭН, но и таких областей науки и техники, как космонавтика, скоростная авиация, ракетостроение, атомная и обычная энергетика, автомобилестроение, приборостроение и т.д.

Нами выдвинута концепция повышения термостойкости керамических материалов путем снижения их температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР) с помощью добавок, обладающих отрицательным значением ТКЛР. Концепция достаточно обоснована как теоретически, так и экспериментально [11, 14]. Полученные керамические композиции

использованы для приготовления подложек и корпусов ПЭН с рабочей температурой 1300 °С и выше [5, 12].

Выбор резистивного материала, предназначенного для формования нагревательного элемента ПЭН, осуществляется в зависимости от ожидаемой рабочей температуры и гибкости нагревателя. Так, в “жестких” ПЭН с высокой рабочей температурой в качестве нагревательного элемента используют вытравленную определенным узором металлическую фольгу или нанесенную на подложку любым способом металлическую пленку. Металлическую фольгу закрепляют на керамическую подложку органической связкой, стеклом или другими связующими материалами. Для нанесения (формования) металлической пленки используют трафаретную печать, вакуумное, воздушно-капельное или плазменное напыление, электролитическое осаждение и т.д. Для фиксации металлической пленки на подложку часто используют метод спекания. Для формования “жестких” нагревательных элементов сравнительно высокотемпературных ПЭН используют также композиции, состоящие из электропроводящих, диэлектрических и связующих компонентов.

В качестве электропроводящих компонентов применяют порошки драгоценных и обычных металлов, оксидные полупроводники, высокотемпературные полупроводниковые соединения переходных металлов (карбиды, нитриды, силициды и бориды), углеродистые порошки и т.д [1-3, 15, 16].

Диэлектрические компоненты в резистивных композициях используются, в основном, для разбавления проводящей фазы и регулирования тем самым электрического сопротивления резистивного элемента. В качестве таких материалов применяют тонкодисперсные порошки корунда, муллита, кремнезема, свинцового сурика, обожженных бентонитовых глин, других материалов и горных пород.

В качестве связующих компонентов в резистивных композициях используют стекла и ситаллы различного состава и органические связующие.

Нанесение резистивной композиции на подложку сплошной пленкой или определенным узором осуществляют аналогично формованию металлической пленки, описанной выше.

В “гибких”, сравнительно низкотемпературных ПЭН в качестве нагревательного элемента используют резистивные композиции, содержащие разнородные электропроводящие порошки, органические пленкообразующие и связующие материалы. Подложка и электроизоляционное защитное покрытие таких ПЭН также изготавливаются из органических полимерных материалов [1, 2, проспекты фирм “Синион”, “Спецмаш” и “Экос”, РФ].

Считалось, что перенос электричества в композиционных резистивных элементах осуществляется через цепочки непосредственно контактирующих между собой частиц электропроводящей фазы. Роль диэлектрических добавок сводилась только к разбавлению проводящей фазы путем разрыва проводящих цепочек. При этом предполагалось, что главной причиной выхода из строя ПЭН являются дуговые разряды, обусловленные электрическим пробоем диэлектрического материала, разделяющего электропроводящие частицы.

Подробные исследования резистивных композиций, приготовленных нами на основе различных электропроводящих материалов (Al, Ni, Fe, Cu, бронза, Fe-Cr-Ni), стекол (силикатные, фосфатные, свинцовые) и керамических наполнителей (Al_2O_3 , горные породы), показали, что диэлектрические составляющие композиций, особенно стекло и стеклокристаллические материалы, обволакивая тонким слоем проводящие частицы, также участвуют в переносе электричества. В результате, помимо снижения среднего значения

электрической проводимости резистивного элемента, происходит значительное уменьшение его ТКЭС, что очень важно для экономии электроэнергии и регулирования температурного режима ПЭН [17].

В качестве токоподводов нагревательных элементов ПЭН используют металлические сетки, решетки, проволоку, фольгу, пленку и т.д. Металлические сетки и пленки преимущественно накладывают на резистивный слой через токопроводящую пасту, решетки, фольгу и проволоку – на подложку под резистивной пастой. При нанесении токопроводящей пленки пользуются трафаретной печатью, воздушно-капельным или плазменным напылением, электролитическим осаждением и т.д.

В качестве электроизоляционных защитных материалов нагревательных элементов ПЭН используются стеклоэмали, диэлектрические оксиды, горные породы и глины, органические полимеры, а также материалы самой подложки. Важно, чтобы защитное покрытие, обладая высокими электроизоляционными свойствами и газонепроницаемостью, не содержало токсичных веществ и было химически пассивным по отношению к резистивному материалу и токоподводам.

Хотя в любом случае резистивные элементы ПЭН защищены от воздействия окружающей среды, условно по этому принципу их подразделяют на две основные группы – “открытые” и “закрытые”. В первую группу включают нагреватели с защитными покрытиями, во вторую – заключенные в герметические корпуса, выполненные из материала подложки. В низкотемпературных ПЭН (25...100 °C), как отмечалось выше, такие корпуса выполнены из органики, в среднетемпературных (80...300 °C) – из металла, стекла или ситалла, в высокотемпературных (300...1000 °C) – из керамики и горных пород, в сверхвысокотемпературных (выше 1000 °C) – из термостойкой или многослойной, чередующейся с металлом керамики.

Изготовление ПЭН на металлических подложках аналогично технологии шликерного эмалирования и включает следующие основные операции:

- формирование корпуса и подготовка его к эмалированию (обезжиривание, травление);
- многослойное эмалирование;
- нанесение, сушка и термообработка (обжиг) резистивного элемента;
- металлизация или закрепление контактных электродов;
- нанесение, сушка и термообработка герметизирующего покрытия;
- подключение ПЭН к токоподводящей и терморегулирующей системе.

Технология изготовления ПЭН на керамической или другой жесткой диэлектрической подложке отличается от вышеизложенного отсутствием процесса эмалирования, а на сырой керамической или терморезистивной органической подложке – дополнительной совместной термообработкой ПЭН в монолитную конструкцию.

Контроль качества изоляции ПЭН особенно важен в случае металлических подложек. Небольшая толщина (< 1 мм) стекломалевого покрытия при значительной площади соприкосновения с токоподводящими и резистивными элементами предопределяет необходимость использования стекол с очень высокими диэлектрическими свойствами для предотвращения электрического пробоя. Задача еще более усложняется при повышенных температурах, когда изоляционные свойства стекломалей резко снижаются. Поэтому такие подложки рекомендуются для использования при рабочих температурах ПЭН, не превышающих 300...400 °C.

Контроль сопротивления резистивного элемента проводится для корректировки электрических параметров ПЭН. Корректировка осуществляется изменением геометрических размеров (толщина, ширина) резистивного слоя методами механического или химического удаления лишнего или нанесения дополнительных слоев.

Токоподводящая и регулирующие системы подбираются в зависимости от топологической модели расположения и числа резистивных элементов. Так, ПЭН классической модели подключают в принудительную схему регулирования температуры (мощности) выбранной модификации. Саморегулирующиеся модели не нуждаются во внешних регулирующих устройствах.

Подводя итоги, можно констатировать:

1. в последние 30-35 лет по сути создан новый класс нагревательных элементов, сочетающих такие ценные качества, как безынерционность, высокие удельные мощности, стойкость по отношению к агрессивным газовым и жидким средам, низкая материалоемкость, высокий КПД, безопасность эксплуатации и т.д.;
2. основные конструкционные решения ПЭН и топологические модели формирования электрорезистивных нагревательных элементов достаточно просты и интересны с точки зрения экономии электроэнергии, безопасной эксплуатации и саморегулирования тепловым режимом приборов;
 - определен круг материалов, необходимых для формирования функциональных и конструкционных узлов ПЭН, предложены простые технологические решения и приемы их подготовки и изготовления ПЭН самого различного назначения с рабочей температурой 25...1000 °C;
3. для надежной работы нагревателей выше 1000 °C требуется резкое повышение их термостойкости, что на практике может быть достигнуто использованием многослойной, чередующейся с металлом керамики или высокотермостойкой керамической композиции. С учетом технологических сложностей и ограниченной надежности первого способа в наших исследованиях выбран путь разработки соответствующей керамики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Низкотемпературные электронагреватели в сельском хозяйстве / Под общ. ред. **Л.С. Герасимович.** – Минск: Ураджай, 1984. - 118с.
2. **Гуль В.Е.** и др. Электропроводящие полимерные материалы - М.: Химия, 1968 - 43с.
3. Пат. США № 4.486.651, Н 05 В 3/10, 1985.
4. Заявка Японии № 56-35270, Н 05 В 3/00, 1981.
5. **Գեորգիան Զ.Ս.** Թաղանթային էլեկտրատարացուցիչների հիմնական առանձնահատկությունները // Գիտություն և տեխնիկա. - 2001. - N 7-9. - էջ 26-29:
6. А.с. СССР № 1202081, Н 05 В 3/14, 1985.
7. Пат. США № 4.364.100, Н 05 К 1/03, 1983.
8. Заявка ФРГ № 2.616.855, Н 05 В 3/28, 1980.
9. Заявка Японии № 54-25254, Н 05 В 3/34, 1979.
10. А.с. СССР № 1016853, Н 05 В 3/18, 1983.
11. **Геодакян Дж.А., Симонян А.М., Степанян С.В., Геодакян К.Д.** Термостойкие керамические композиции. 1. Постановка задачи // Огнеупоры и Техническая Керамика. – 2006. - № 8. - С. 2-7.
12. **Խրիվյան Ն.Գ.** Ջերմակայուն պլումաօքսիդային վակուումիսիտ խեցեղեն // ՀՀ ԳԱԱ գիտ. և տեխնոլոգիական տեխնոլոգիաների ազգային հիմնադրամ: Հայաստանի քիմիական գիտությունը XXI դարի շեմին - թեզիսների ժողովածու. - Երևան, 18-20.05.2000. - էջ 92.
13. **Geodakyan J.A., Kostanyan A.K., Petrosyan B.V., Sagatelyan S.T., Pogosyan E.G., Geodakyan K.J.** Preliminary Results on the Development of Thermal-Shock Resistance Aluminium Oxide Ceramics // International conference “Nonisothermal phenomena and processes” in honor of the 75th Anniversary of Professor Alexander G. Merzhanov, Yerevan, November 2006, - Book of Abstracts, P. 124-125.
14. ՀՀ Արտոնագիր N 1963, С 04 В 33/00, С 03 С 10/00, 2007.
15. ՀՀ Արտոնագիր N 554828, Н 05 В 3/14, 2007.
16. **Геодакян Д.А., Степанян С.В., Геодакян К.Д.** Возможность получения объемных резисторов на основе стеклометаллических композиций // Труды международной научно-практической конференции “Наука и технология силикатных материалов – настоящее и будущее”. - М., 2003. - Т. 3, - С. 262.
17. **Геодакян Д.А., Степанян С.В., Сагатеян С.Т.** Окисление тонкодисперсных порошков металлов на воздухе и в смесях со стеклами // Տեղեկագիր Հայաստանի շինարարների - հատուկ թողարկում. - 2001. - 2(20). - էջ. 17-19:

НПП Материаловедения РА.

Материал поступил в редакцию 10.07.2007.

Ջ.Ա. ԳԵՈՂԱԿՅԱՆ

ԹԱՂԱՆԹԱՅԻՆ ԷԼԵԿՏՐՈՍԱՔԱՑՈՒՑԻՉՆԵՐ

1. ՖՈՒՆԿՑԻՈՆԱԼ ԵՎ ԿԱՌՈՒՑՎԱԾՔԱՅԻՆ ԱՌԱՆՁՆԱՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐ (ԱԿՆԱՐԿ)

Բերված են թաղանթային էլեկտրատաքացուցիչ սարքերի ֆունկցիոնալ և կառուցվածքային առանձնահատկությունները, տաքացուցիչների և նրանց առանձին հանգույցների կառուցվածքի, բաղադրության և պատրաստման վերաբերյալ եղած հայտնի գրական աղբյուրների վերլուծությունը:

Առանցքային բառեր. տաքացուցիչ, թաղանթային, էլեկտրական սարք, տակդիր, դիմադրողական տարր, պաշտպանիչ ծածկույթ:

J.A. GEODAKYAN

FILM ELECTRIC HEATERS

1. FUNCTIONAL AND CONSTRUCTIONAL FEATURES (REVIEW)

The functional and constructional features of film electric heaters are listed. Reviews of literature sources on constructions, compositions and technologies of producing separate junctions and heaters in general for all types of use are given.

Keywords: heater, film, electric, device, substrate, resistive element, protective coat.

Ս.Գ. ԱՂԲԱԼՅԱՆ, Ա.Հ. ՀՈՎՍԵՓՅԱՆ, Ա.Ս. ԳՐԻԳՈՐՅԱՆ,
Ս.Մ. ԻՍՐԱՅԵԼՅԱՆ, Ս.Ա. ՀԱՐՈՒԹՅՈՒՆՅԱՆ

ՍՈԼԻԲԴԵՆԻ ԽՏԱՆՅՈՒԹԵՐԻՑ ՍՈԼԻԲԴԵՆԻ ԴԻՍԻԼԻՑԻԴԻ ՍՏԱՑՄԱՆ ՏԵԽՆՈԼՈԳԻԱՅԻ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԸ

Կատարվել է սիլիկաջերմային մեթոդով մոլիբդենիտային խտանյութերից մոլիբդենի դիսիլիցիդի ստացման թերմոդինամիկական վերլուծություն, հաշվարկվել են վերականգնման ռեակցիաների Գիբսի էներգիայի փոփոխության և հավասարակշռության հաստատունների արժեքները՝ կախված ջերմաստիճանից: Առաջարկվել է մոլիբդենի դիսիլիցիդի ստացման տեխնոլոգիական սխեման:

Առանցքային բառեր. մոլիբդենիտային խտանյութ, մոլիբդենի դիսիլիցիդ, հրակայունություն, թերմոդինամիկա, մաքրում, սիլիկաջերմային մեթոդ, սինթեզ, ռենտգենագրամ:

Մոլիբդենի դիսիլիցիդը 1300...1800°C ջերմաստիճաններում օժտված է բարձր հրակայունությամբ [1]: Այն գործնականորեն կայուն է հանքային թթուների (H_2SO_4 , HF, HCl, HNO_3) նկատմամբ, սակայն հեշտությամբ լուծվում է ազոտական և ֆտորաջրածնային թթուների խառնուրդում: 1000°C ջերմաստիճանում MoSi₂-ը կայուն է SO₂, CO₂, NO₂ գազերի և հալված մետաղների նկատմամբ (Na, K, Zn, Sn, Sb, Cu և այլն):

Այն լայն կիրառություն է գտել ժամանակակից տեխնիկայի հետևյալ բնագավառներում՝

- տաքացուցիչների արտադրությունում, որտեղ օգտագործվում է որպես նյութ օդի և ազոտի գազերի միջավայրերում շահագործվող բարձրջերմաստիճանային էլեկտրավառարանների տաքացուցիչների պատրաստման համար,
- պողպատի արտադրությունում՝ որպես լեգիրող հավելանյութ, ֆերոմոլիբդենի փոխարեն,
- ծածկութապատման համար՝ մոլիբդենից պատրաստված իրերի վրա քիմիապես կայուն և կիզակայուն ծածկույթների ստացման համար,
- ջերմափոխանակիչների պատրաստման ժամանակ, որպես նյութ ատոմային կայանքներում տեղի ունեցող գործընթացների ժամանակ անջատվող ջերմության հեռացման նպատակով նախատեսված ջերմափոխանակիչների պատրաստման համար և այլն:

Մոլիբդենի դիսիլիցիդ ստացվում է հետևյալ եղանակներով. էլեմենտներից սինթեզելով, բարձրջերմաստիճանային ինքնատարածվող սինթեզի (ԲԻՄ-մեթոդ), ալյումինա-, սիլիկաջերմային, կարբոթերմային, պղնձասիլիցիդային, գազային ֆազերից և քլորիդների խառնուրդներից նստեցման մեթոդներով և այլն [2]:

Թվարկվածներից ամենատարածվածը ԲԻՄ-մեթոդն է [3], որի ժամանակ մոլիբդենի դիսիլիցիդի ստացման համար որպես էլանյութեր օգտագործվում են մաքուր մետաղական մոլիբդենի փոշի և K₂O մակնիշի Si: Մետաղական մոլիբդենի փոշու ստացման համար նախապես մոլիբդենիտային խտանյութը ենթարկվում է օքսիդացուցիչ թրծման: Թրծման արդյունքում մթնոլորտ են արտանետվում զգալի քանակությամբ ծծմբային գազեր (SO₂, SO₃)՝

աղտոտելով այն: Բացի դրանից, այրման ժամանակ կորչում են մեծ քանակությամբ էլեմենտներ:

Աշխատանքի նպատակն է՝ տեղական մոլիբդենի հումքի (MoS₂) բազայի վրա մշակել մոլիբդենի դիսիլիցիդի՝ սիլիկաջերմային մեթոդով ստացման շահութաբեր և էկոլոգիապես պաշտպանված տեխնոլոգիա:

Հաշվի առնելով, որ գրականության մեջ բացակայում են MoS₂ -ի և Si-ի փոխազդեցության ռեակցիաների թերմոդինամիկական վերլուծությունները, կատարվել է նախնական թերմոդինամիկական հաշվարկ, պարզելու համար MoS₂-ից MoSi₂-ի ստացման ռեակցիաների հավանականությունը սիլիկաջերմային վերականգնման եղանակով՝ ինչպես չեզոք (հելիում, վակուում), այնպես էլ վերականգնող (ջրածին) միջավայրերում: Որոշվել են Գիբսի էներգիայի $\Delta(G^0_T)$ փոփոխության արժեքները 298...1500 Կ ջերմաստիճանային տիրույթում: Հաշվարկները կատարվել են Տեմկին-Շվարցմանի մեթոդով, ըստ աղյուսակ 1-ում բերված տվյալների [4]: Հաշվի են առնվել ֆազային փոխարկումները էնթալպիայի և էնտրոպիայի արժեքներում: Համեմատելի տվյալներ ստանալու համար հաշվարկները կատարվել են 1 մոլ-ատոմ Si-ի համար: Հաշվարկների արդյունքները ներկայացված են գրաֆիկորեն (նկ. 1):

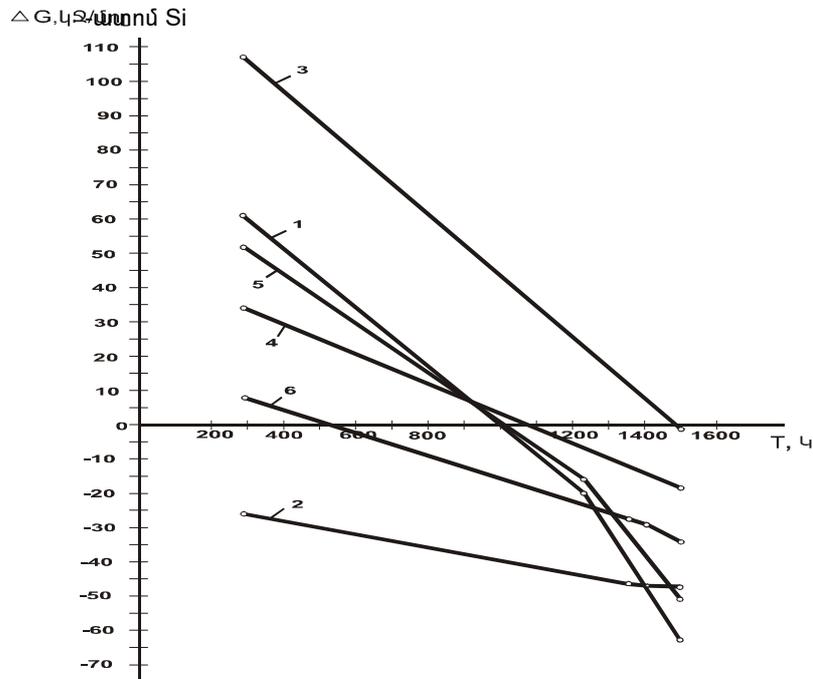
Ելնելով Գիբսի էներգիայի փոփոխության արժեքներից՝ նշված ռեակցիաների համար հաշվարկվել են նաև հավասարակշռության հաստատունների արժեքները (K)՝ կախված ջերմաստիճանից (աղ. 2):

Աղյուսակ 1

Թերմոդինամիկական հաշվարկների համար անհրաժեշտ տվյալներ

Տարր, միացություն	$-\Delta H^0_{298},$ կՋ/մոլ	$S^0_{298},$ Ջ/մոլ աստ.	$T_{հալմ.}$ Կ	$T_{եռմ.},$ Կ	Ջերմունակություն, $C_p = \alpha_0 + \alpha_1 \cdot 10^{-3}T +$ $+ \alpha_2 \cdot 10^{-5}T^2$
MoS ₂	275,1	62,6	1948	-	$71,76 + 7,45 \cdot 10^{-3}T -$ $- 9,20 \cdot 10^{-5}T^2$
MoSi ₂	131,8	65,1	2303	-	$67,96 + 11,97 \cdot 10^{-3}T -$ $- 6,57 \cdot 10^{-5}T^2$
SiS	-105,9	223,8	1213	-	$35,92 + 0,92 \cdot 10^{-3}T -$ $- 3,52 \cdot 10^{-5}T^2$
SiS ₂	213,5	80,3	1363	1403	102,99 (1363 – 2000)
H ₂ S	20,5	205,8	-	-	$32,7 + 12,39 \cdot 10^{-3}T -$ $- 1,92 \cdot 10^{-5}T^2$
Si	-	18,8	-	-	$23,95 + 2,47 \cdot 10^{-3}T -$ $- 4,14 \cdot 10^{-5}T^2$
H ₂	-	130,6	-	-	$27,3 + 3,26 \cdot 10^{-3}T +$ $+ 0,5 \cdot 10^{-5}T^2$
S ₂	-128,7	228,1	-	-	$35,75 + 1,17 \cdot 10^{-3}T -$ $- 3,3 \cdot 10^{-5}T^2$

Ինչպես երևում է նկար 1-ից և աղյուսակ 2-ից, բերված բոլոր ռեակցիաները թերմոդինամիկորեն ընթացող են: Ռեակցիաների ընթանալու հավանականությունը ջերմաստիճանի բարձրացմանը զուգընթաց մեծանում է: 1403 Կ-ից բարձր ջերմաստիճաններում առավել հավանական են 1, 2, 5 և 6 ռեակցիաները: Այսպիսով, նախնական թերմոդինամիկական հաշվարկները ցույց են տալիս



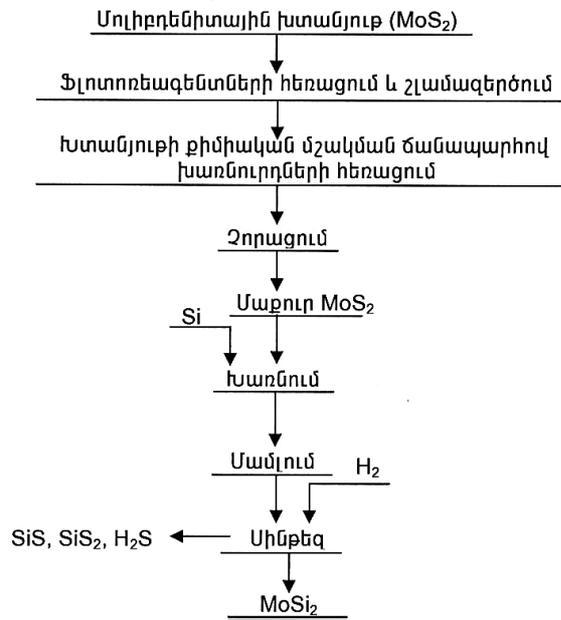
Նկ. 1. Գիբսի էներգիայի կախումը ջերմաստիճանից (ռեակցիաների համարները համընկնում են աղ. 2-ում բերված ռեակցիաների համարների հետ)

Աղյուսակ 2

Մոլիբդենի դիսիլիցիդի ստացման ռեակցիաների հավասարակշռության հաստատունների արժեքների կախումը ջերմաստիճանից

	Ռեակցիայի հավասարումը	Ջերմաստիճանը, Կ				
		298	1213	1363	1403	1500
1	$1/4\text{MoS}_2 + \text{Si} = 1/4\text{MoSi}_2 + 1/2\text{SiS}$	$2 \cdot 10^{-11}$	7,3	–	–	$1,6 \cdot 10^2$
2	$1/3\text{MoS}_2 + \text{Si} = 1/3\text{MoSi}_2 + 1/3\text{SiS}_2$	$3,7 \cdot 10^4$	–	60,8	57,3	44,7
3	$1/2\text{MoS}_2 + \text{Si} = 1/2\text{MoSi}_2 + 1/2\text{S}_2$	$13 (10^{-3})$	–	–	–	1,11
4	$1/2\text{MoS}_2 + \text{Si} + \text{H}_2 = 1/2\text{MoSi}_2 + \text{H}_2\text{S}$	$1,1 \cdot 10^{-6}$	–	–	–	2,25
5	$1/3\text{MoS}_2 + \text{Si} + 1/3\text{H}_2 = 1/3\text{MoSi}_2 + 1/3\text{H}_2\text{S} + 1/3\text{SiS}$	$7,6 \cdot 10^{-10}$	4,9	–	–	61,7
6	$3/7\text{MoS}_2 + \text{Si} + 4/7\text{H}_2 = 3/7\text{MoSi}_2 + 4/7\text{H}_2\text{S} + 1/7\text{SiS}_2$	$3,5 \cdot 10^{-2}$	–	11,38	12,3	15,14

MoSi₂-ի ստացման հնարավորությունը ջրածնի ներկայությամբ, սիլիկաջերմային եղանակով:
 Այլ. 2-ում բերված է մոլիբդենիտային խտանյութից սիլիկաջերմային մեթոդով բարձր մաքրության մոլիբդենի դիսիլիցիդի ստացման տեխնոլոգիական սխեման:



Այլ.2. Բարձր մաքրությամբ մոլիբդենի դիսիլիցիդի ստացման տեխնոլոգիական սխեմա

Կատարված քիմիական վերլուծության արդյունքում պարզվել է, որ ՀՀ-ում արտադրվող մոլիբդենիտային խտանյութերն ունեն հետևյալ մոտավոր բաղադրությունը, %.
 Mo=51,8; Cu=0,44; Fe=1,8; SiO₂= 6,90; Al₂O₃=0,82; CaO=0,75; MgO=0,90; S=35,67; Re=0,025: Ինչպես տեսնում ենք, մոլիբդենիտային խտանյութը, հիմնական բաղադրիչից (MoS₂) բացի, պարունակում է նաև մեծ քանակությամբ խառնուրդներ (Cu, Fe, Zn, Al₂O₃, SiO₂, MgO և այլն), որոնք կարող են ազդել ստացվող մոլիբդենի դիսիլիցիդի հատկությունների վրա: Այդ խառնուրդների պարունակության պակասեցման նպատակով կատարվել է մոլիբդենիտային խտանյութի մաքրում:

Մաքրման գործընթացը ներառում է ֆլոտոռեագենտների հեռացում, շլամազերծում և խտանյութի քիմիական մշակում փուլերը: Մաքրված դիսուլֆիդը ֆիլտրվել է և չորացվել օդում, մինչև կշռի կայունացումը: Մաքրումից հետո կատարվել է ստեխիոմետրիկ քանակությամբ ելանյութերի՝ MoS₂-ի և Kp00 մակնիշի Si-ի խառնում: Ստացված խառնուրդից մամլման եղանակով պատրաստվել են բրիկետներ, որոնք այնուհետև ենթարկվել են սինթեզի: Օքսիդացման գործընթացները կանխելու նպատակով վերականգնումը տարվել է ջրածնի միջավայրում:

Ռեակցիաների արդյունքում մոլիբդենը միանում է սիլիցիումի հետ և առաջացնում մոլիբդենի դիսիլիցիդ, իսկ ծծումբը սիլիցիումի սուլֆիդների (SiS, SiS₂) տեսքով ամբողջությամբ հեռանում է ռեակցիայի տարածքից և կոնդենսացվում սառնարանում: Առաջացած սիլիցիումի

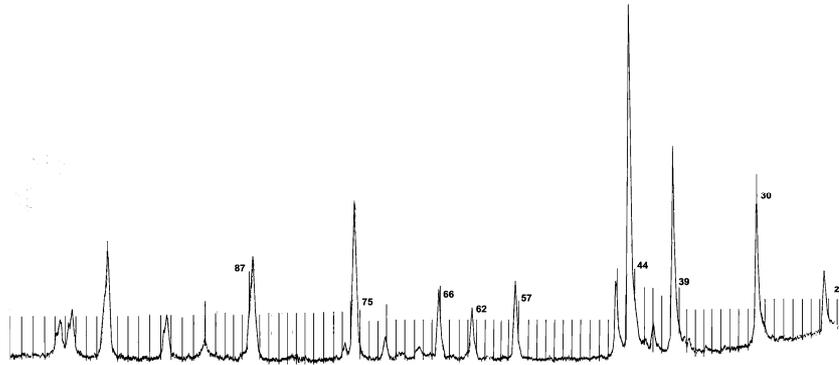
սուլֆիդները կարելի է օգտագործել որպես ֆլոտոռեագենտ՝ պղնձամոլիբդենային հանքանյութերի հարստացման գործընթացում:

Մոլիբդենի դիսիլիցիդի ստացման օպտիմալ պայմանների որոշման համար սինթեզն իրականացվել է տարբեր ջերմաստիճաններում: Փորձերը կատարվել են 1073...1473 Կ միջակայքում և տարբեր տևողությամբ (30, 60, 90, 120 րոպե):

Աղյուսակ 1-ից երևում է, որ սիլիցիումի սուլֆիդները (SiS և SiS₂) գազային վիճակի են անցնում 1403 Կ-ից բարձր ջերմաստիճանում: Այդ իսկ պատճառով, որպեսզի ռեակցիայի տարածքից հեռացվեն սիլիցիումի սուլֆիդները, սինթեզը տարվել է 1403 Կ-ից բարձր ջերմաստիճանում:

Տարբեր ռեժիմներում (ջերմաստիճան, տևողություն) ստացված նմուշների ուսումնասիրությունները ցույց են տվել, որ 1423 Կ-ում և մեկ ժամ տևողության դեպքում առաջանում է բարձր մաքրության մոլիբդենի դիսիլիցիդ:

Նկ.3-ում բերված է օպտիմալ պայմաններում (1423 Կ և մեկ ժամ տևողություն) մոլիբդենիտային խտանյութից սիլիկաջերմային մեթոդով ստացված մոլիբդենի դիսիլիցիդի ռենտգենագիրը, իսկ աղյուսակ 3-ում՝ մոլիբդենի դիսիլիցիդի հետ չափանմուշային ռենտգենագրի դիֆրակցիոն մաքսիմումների համադրությունը:



Նկ. 3. Մոլիբդենիտային խտանյութից սիլիկաջերմային մեթոդով ստացված մոլիբդենի դիսիլիցիդի ռենտգենագիրը

Ռենտգենագրի վերլուծությունից և դիֆրակցիոն մաքսիմումների համադրությունից (աղյուսակ 3) երևում է, որ նշված պայմաններում ստացվել է բարձր մաքրության մոլիբդենի դիսիլիցիդ: Կատարվել է նաև ստացված արգասիքների քիմիական վերլուծություն, որը նույնպես ապացուցել է բարձր մաքրության մոլիբդենի դիսիլիցիդի ստացումը:

Ուսումնասիրությունները ցույց են տվել, որ հայտնի մեթոդների հետ համեմատած, մոլիբդենիտային խտանյութից ջրածնի միջավայրում սիլիկաջերմային մեթոդով MoSi₂-ի ստացումն ունի որոշակի առավելություններ. այն տնտեսապես շահավետ է և պաշտպանված՝ բնապահպանական տեսակետից:

Աղյուսակ 3

Մոլիբդենի դիսիլիցիդի ռենտգենագրի դիֆրակցիոն մաքսիմումների համադրումը

Փորձնական նմուշ			MoSi ₂	
θ, °	d, ժ	I/I ₀	d, ժ	I/I ₀
15,00	2,9785	40,50	2,94	20
19,85	2,2703	55,80	2,245	50
22,35	2,02725	100	2,01	60
23,10	1,96487	21,15	1,947	20
28,70	1,60525	21,60	1,60	25
31,25	1,48599	14,40	1,471	20
33,60	1,41162	18,90	1,398	25
36,05	1,30994	7,20	1,30	15
37,75	1,25918	41,4	1,245	100
43,40	1,12197	3,15	1,122	50
45,70	1,07621	2,7	1,078	13
46,7	1,05925	10,8	1,050	30
50,65	0,99998	11,7	1,00	80
52,25	0,97496	2,88	0,978	25
52,5	0,97169	3,15	0,972	25

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. **Самсонов Г.В., Дворина Л.А., Рудь Б.М.** Силициды.-М.: Металлургия, 1979.- 272 с.
2. **Зеликман А.Н.** Молибден.-М.: Металлургия, 1970.- 440с.
3. **Кислый П.С., Бадьян А.Х., Киндышева В.С., Гарибян Ф.С.** Высокотемпературные неметаллические нагреватели.-Киев: Наукова думка, 1981.- 160с.
4. **Рузинов П.П., Гуляницкий Б.С.** Равновесные превращения металлургических реакций.-М.: Металлургия, 1975.- 416с.

ՀՊՃՀ: Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 24.05.2006:

С.Г. АГБАЛЯН, А.О. ОВСЕПЯН, А.С. ГРИГОРЯН, С.М. ИСРАЕЛЯН,
С.А. АРУТЮНЯН

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ДИСИЛИЦИДА МОЛИБДЕНА ИЗ
МОЛИБДЕНИТОВОГО КОНЦЕНТРАТА

Исследована термодинамика реакции получения дисилицида молибдена из молибденитового концентрата методом силикотермии. Рассчитаны величина энергии Гиббса и константы равновесия протекающих реакций в зависимости от температуры. Разработана технологическая схема получения дисилицида молибдена.

Ключевые слова: концентрат молибдена, дисилицид молибдена, окалиностойкость, термодинамика, силикотермический метод, синтез.

S.G. AGHBALYAN, A.H. HOVSEPYAN, A.S. GRIGORYAN,
S.M. ISRAYELYAN, S.A. HARUTYUNYAN

INVESTIGATION OF TECHNOLOGY FOR OBTAINING MOLYBDENUM DISILICIDE FROM
MOLYBDENUM CONCENTRATES

The thermodynamics of obtaining molybdenum disilicide from molybdenum concentrates by silicon-thermal method is investigated. The value of the Gibbs energy changing and the constants of equilibiums are calculated for progressing the reactions depending on temperature. The flow sheet of obtaining molybdenum disilicide is developed.

Keywords: molybdenum concentrate, molybdenum disilicide, nonscaling, thermodynamics, silicon-thermal method, synthesis.

В.С. ХАЧАТРЯН, Н.П. БАДАЛЯН, М.Г. ТАМРАЗЯН, К.В. ХАЧАТРЯН,
М.А. МНАЦАКАНЯН, С.Э. ГРИГОРЯН, А.Г. ГУЛЯН, С.А. АПРОЯН

УЧЕТ КОМПЛЕКСНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ТРАНСФОРМАЦИИ ТРАНСФОРМАТОРОВ ПРИ ПОСТРОЕНИИ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ УСТАНОВИВШИХСЯ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Предлагается метод построения матриц обобщенных пассивных параметров с учетом комплексных коэффициентов трансформации трансформаторов, используемых при построении математических моделей установившихся и других режимов электроэнергетических систем.

Ключевые слова: параметр, трансформатор, матрица, система, коэффициент, режим, уравнение, модель, функция, схема.

Современная сложная электроэнергетическая система (ЭЭС) состоит из участков электрических сетей с разными номинальными напряжениями, которые связаны между собой повышающими и понижающими трансформаторами или автотрансформаторами.

При построении математической модели установившегося режима ЭЭС в большинстве случаев необходимо учесть наличие трансформаторов, которые в общем случае характеризуются комплексными коэффициентами трансформации [1-18].

В работах [1, 2, 7, 8] достаточно подробно говорится о необходимости учета комплексных коэффициентов трансформации при решении режимных вопросов ЭЭС. Однако ничего не отмечается о том, как представить расчетную схему трансформатора и как ее учесть при построении матриц обобщенных параметров с учетом комплексных коэффициентов трансформации.

Рассматривается схема замещения ЭЭС, между узлами которых функционирует трансформатор с комплексными коэффициентами трансформации. Выделяя ветвь $i - j$, в которой функционирует трансформатор с комплексным коэффициентом трансформации, соответствующую схему можно представить в виде, показанном на рис. 1.

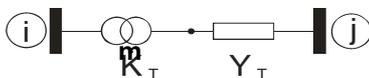


Рис. 1. Ветвь с идеальным трансформатором

На рис. 1 показана ветвь, которая находится между узлами i и j и состоит из двух последовательно соединенных ветвей: ветвь с идеальным трансформатором с комплексным коэффициентом трансформации \dot{K}_T и ветвь с комплексной проводимостью Y_T .

Первичной обмоткой трансформатора считается та, которая расположена со стороны начала ветви.

Задача заключается в следующем: построить такую схему, которая может рассматриваться как эквивалентная ветвь, заменяющая ветви с трансформатором, при котором при задании численных значений комплексных коэффициентов трансформации она превращается в обыкновенную ветвь, и относительно нее можно поступить как с обыкновенной ветвью. Сначала рассмотрим ветвь, приведенную на рис. 1.

Как было сказано, данная ветвь состоит из последовательно соединенных участков im и mj . Первый участок (im) можно рассматривать как ветвь с идеальным трансформатором, и матрица постоянных коэффициентов формы $[A]$ имеет вид

$$[A_1] = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \dot{K}_T & \dot{K}_T \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Второй участок (mj) рассматривается как одноэлементная ветвь, и соответствующая матрица постоянных коэффициентов имеет вид

$$[A_2] = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{Y} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Матрица постоянных коэффициентов формы $[A]$ для схемы рис. 1 определяется как результат каскадного соединения двух участков (im) и (mj), при котором можем написать

$$[A_3] = [A_1] \cdot [A_2] \quad (3)$$

или

$$[A_3] = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{\dot{K}_T Y} \\ \dot{K}_T & \dot{K}_T \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Представим схему замещения рис. 1 в виде эквивалентной Π – образной схемы (рис. 2). Матрица постоянных коэффициентов формы $[A]$ Π – образного четырехполюсника определяется в виде

$$[A_{\Pi}^1] = \begin{bmatrix} 1 + \frac{Y_{ac}}{Y_{bc}} & \frac{1}{Y_{bc}} \\ Y_{ab} + Y_{ac} + \frac{Y_{ab} Y_{ac}}{Y_{bc}} & 1 + \frac{Y_{ab}}{Y_{bc}} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Теперь необходимо установить выражения для ветвей Π – образного четырехполюсника, т.е. выражения для Y_{bc} , Y_{ac} и Y_{ab} (рис. 2).

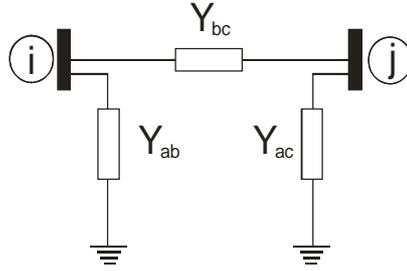


Рис. 2. П – образный четырехполюсник

Для установления выражения вышеотмеченных параметров воспользуемся условием

$$[A_3] = [A_n] \quad (6)$$

или

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{\dot{K}_T} & \frac{1}{\dot{K}_T Y} \\ 0 & \dot{K}_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + \frac{Y_{ac}}{Y_{bc}} & \frac{1}{Y_{bc}} \\ Y_{ab} + Y_{ac} + \frac{Y_{ab} Y_{ac}}{Y_{bc}} & 1 + \frac{Y_{ab}}{Y_{bc}} \end{bmatrix}. \quad (7)$$

На основании (7) можем установить следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} \frac{1}{\dot{K}_T} = 1 + \frac{Y_{ac}}{Y_{bc}}, & \frac{1}{\dot{K}_T Y} = \frac{1}{Y_{bc}}, \\ 0 = Y_{ab} + Y_{ac} + \frac{Y_{ab} Y_{ac}}{Y_{bc}}, & \dot{K}_T = 1 + \frac{Y_{ab}}{Y_{bc}}. \end{cases} \quad (8)$$

Из второго уравнения системы (8) непосредственно можно установить выражения для искомой Y_{bc} :

$$Y_{bc} = \dot{K}_T Y. \quad (9)$$

Из первого уравнения системы (8) можно установить выражение для искомой Y_{ac} , в данном случае:

$$Y_{ac} = (1 - \dot{K}_T) Y. \quad (10)$$

Пользуясь третьим уравнением системы (8), устанавливаем выражение для Y_{ab} :

$$Y_{ab} = \dot{K}_T (\dot{K}_T - 1) Y. \quad (11)$$

Поскольку установлены выражения для Y_{bc} , Y_{ab} и Y_{ac} без использования последнего уравнения системы (8), то это означает, что из полученной системы (8) независимыми являются три уравнения.

В результате П – образный четырехполюсник, приведенный на рис. 2, примет вид, представленный на рис. 3.

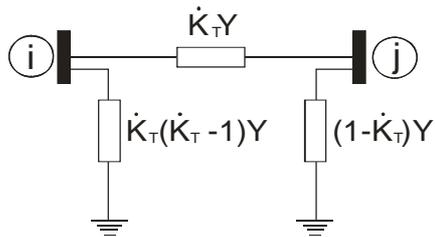


Рис. 3. Эквивалентная ветвь, заменяющая ветвь с трансформатором

Такая схема впервые предложена в [3]. На основании полученной эквивалентной ветви нетрудно установить выражения собственных и взаимных проводимостей узлов i и j .

Теперь рассмотрим ветвь с трансформатором, приведенную на рис. 4

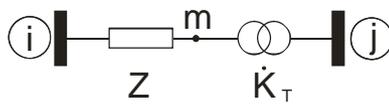


Рис. 4. Ветвь с идеальным трансформатором

Рассматривая участок im как одноэлементную ветвь, коэффициент уравнения формы $[A]$ будет иметь вид

$$[A_4] = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{Y} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (12)$$

Для второго участка, т.е. для ветви с идеальным трансформатором, можем написать

$$[A_5] = \begin{bmatrix} \frac{1}{\dot{K}_T} & 0 \\ 0 & \dot{K}_T \end{bmatrix}. \quad (13)$$

Результирующий $[A_6]$ определяется в виде

$$[A_6] = [A_4] \cdot [A_5] \quad (14)$$

или

$$[A_6] = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{Y} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{1}{\dot{K}_T} & 0 \\ 0 & \dot{K}_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\dot{K}_T} & \frac{\dot{K}_T}{Y} \\ 0 & \dot{K}_T \end{bmatrix}. \quad (15)$$

В результате можем написать

$$\begin{bmatrix} 1 & \dot{K}_T \\ \dot{K}_T & Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + \frac{Y_{ac}}{Y_{bc}} & \frac{1}{Y_{bc}} \\ Y_{ab} + Y_{ac} + \frac{Y_{ab}Y_{ac}}{Y_{bc}} & 1 + \frac{Y_{ab}}{Y_{bc}} \end{bmatrix}. \quad (16)$$

Приравнивая соответствующие элементы, получим следующую систему:

$$\begin{cases} \frac{1}{\dot{K}_T} = 1 + \frac{Y_{ac}}{Y_{bc}}, & \frac{\dot{K}_T}{Y} = \frac{1}{Y_{bc}}, \\ 0 = Y_{ab} + Y_{ac} + \frac{Y_{ab}Y_{ac}}{Y_{bc}}, & \dot{K}_T = 1 + \frac{Y_{ab}}{Y_{bc}}. \end{cases} \quad (17)$$

Из второго уравнения полученной системы (17) можем написать

$$Y_{bc} = \frac{Y}{\dot{K}_T}. \quad (18)$$

Из первого уравнения системы (17) получим

$$Y_{ac} = \frac{Y}{\dot{K}_T} \left(\frac{1 - \dot{K}_T}{\dot{K}_T} \right). \quad (19)$$

На основании третьего уравнения из системы (17) устанавливаем

$$Y_{ab} = Y \left(\frac{\dot{K}_T - 1}{\dot{K}_T} \right). \quad (20)$$

В результате получаем искомые выражения параметров схемы, приведенной на рис. 5.

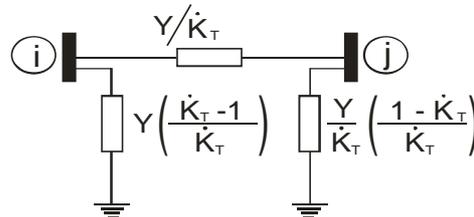


Рис. 5. Эквивалентная ветвь, заменяющая ветвь с трансформатором

Представим эквивалентную ветвь в виде рис. 6.

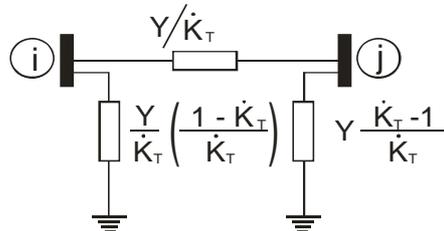


Рис. 6. Эквивалентная ветвь, заменяющая ветвь с трансформатором с комплексным коэффициентом трансформации

Такая схема впервые была предложена в [5] и вытекает из метода, предложенного в [3].

Действительно, для схемы рис. 3 принято соотношение $1:K_T$. Если принять соотношение $K_T:1$, то можем написать

$$\dot{K}_T Y \Rightarrow Y : \dot{K}_T, \quad (21)$$

$$\frac{Y}{\dot{K}_T} \left(\frac{1 - \dot{K}_T}{\dot{K}_T} \right) \Rightarrow \dot{K}_T (\dot{K}_T - 1) Y, \quad (22)$$

$$Y \left(\frac{\dot{K}_T - 1}{\dot{K}_T} \right) \Rightarrow (1 - \dot{K}_T) Y \quad (23)$$

Или

$$Y : \dot{K}_T \Rightarrow \dot{K}_T Y, \quad (24)$$

$$\dot{K}_T (\dot{K}_T - 1) Y \Rightarrow \frac{Y}{\dot{K}_T} \left(\frac{1 - \dot{K}_T}{\dot{K}_T} \right), \quad (25)$$

$$(1 - \dot{K}_T) Y \Rightarrow Y \left(\frac{\dot{K}_T - 1}{\dot{K}_T} \right). \quad (26)$$

Можно заметить, что из схемы, приведенной на рис. 3, мы с небольшим трудом перешли к схеме, приведенной на рис. 6. Схема рис. 3 применяется при построении Y матрицы обобщенных параметров. Следует отметить, что в приведенной схеме на рис. 6 рассмотрен случай, когда коэффициенты трансформации трансформатора являются комплексными.

Однако в частном случае можно принять $\dot{K}_T = K$, когда эквивалентная ветвь, приведенная на рис. 6, будет представлена в виде рис. 7.

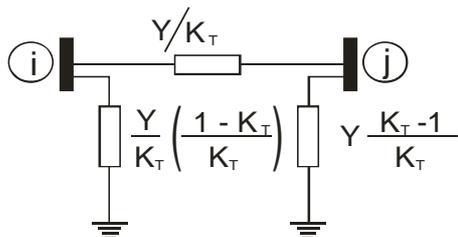


Рис. 7. Эквивалентная ветвь, заменяющая ветвь с трансформатором с действительным коэффициентом трансформации

При этом схема, приведенная на рис. 7, представляется также в виде рис. 8.

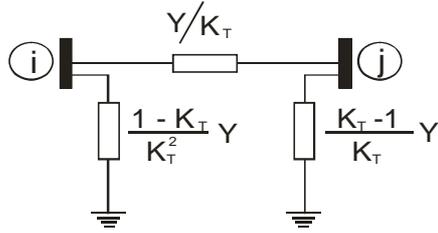


Рис. 8. Π – образный четырехполюсник

При построении Z матрицы обобщенных параметров целесообразно ветви эквивалентного Π – образного четырехполюсника представить через Z сопротивления идеального трансформатора.

В этом случае эквивалентирующие матрицы можно представить в виде

$$\begin{bmatrix} \dot{K}_T & \dot{K}_T Z \\ 0 & \dot{K}_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + \frac{Z_{bc}}{Z_{ac}} & Z_{bc} \\ \frac{1}{Z_{ab}} + \frac{1}{Z_{ac}} + \frac{Z_{bc}}{Z_{ab} Z_{ac}} & 1 + \frac{Z_{bc}}{Z_{ab}} \end{bmatrix}. \quad (27)$$

При этом система эквивалентирующих уравнений представляется в виде

$$\begin{cases} \dot{K}_T = 1 + \frac{Z_{bc}}{Z_{ac}}, & \dot{K}_T Z = Z_{bc}; \\ 0 = \frac{1}{Z_{ab}} + \frac{1}{Z_{ac}} + \frac{Z_{bc}}{Z_{ab} Z_{ac}}, & \frac{1}{\dot{K}_T} = 1 + \frac{Z_{bc}}{Z_{ab}}. \end{cases} \quad (28)$$

Из (2) непосредственно устанавливаем

$$Z_{bc} = \dot{K}_T Z. \quad (29)$$

Из (1) можно установить

$$Z_{ab} = \frac{\dot{K}_T^2}{1 - \dot{K}_T} Z. \quad (30)$$

Из (3) получаем

$$Z_{ac} = \frac{\dot{K}_T}{\dot{K}_T - 1} Z. \quad (31)$$

Соответствующая схема представляется в следующем виде (рис.9).

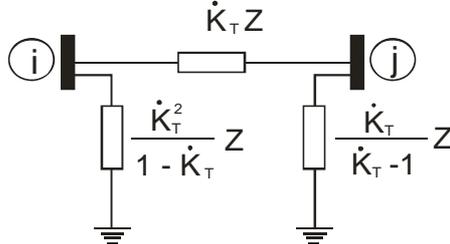


Рис. 9. Z эквивалентная ветвь, заменяющая ветвь с трансформатором с комплексным коэффициентом трансформации

Разумеется, схема, приведенная на рис. 9, будет функционировать также при действительных коэффициентах трансформации трансформатора и принимает вид, показанный на рис. 10.

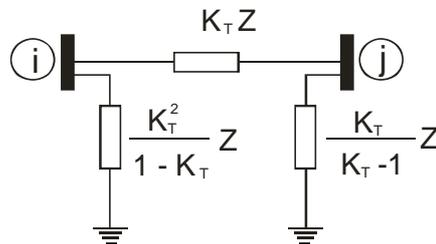


Рис. 10. Z эквивалентная ветвь, заменяющая ветвь с трансформатором при действительных коэффициентах трансформации

После построения матриц обобщенных пассивных параметров при действительных коэффициентах трансформации (что часто встречается в действительных ЭЭС) нетрудно построить математические модели как установившихся, так и других режимов ЭЭС.

Отметим, что после построения матриц вышеуказанных пассивных параметров нетрудно построить также Y-Z матрицу, которая в настоящее время весьма широко используется при решении различных режимных вопросов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Мельников Н.А.** Расчеты режимов работы сетей электрических систем.-М.: Госэнергоиздат. 1950.- 324 с.
2. **Фазылов Х.Ф.** Теория и методы расчета режимов электрических систем.- Ташкент: Изд-во АН УзССР.- 1953. - 176с.
3. **Ward J.B., Hale H.W.** Digital computer solution of power – flow problems // Power Apparatus and systems.- 1956.-V. 75, N 24.-P. 398-404.
4. **Gupta P.P., Graduate B.S., Dabies M.W.** Digital computers in power system analysis // IEEE.-1961.-N 3484S.- P. 383-404.
5. **Brown H.E., Carter G.H., Happ H.H. Person C.E.** Power flow solution by impedance matrix iterative method // IEEE Transactions.-1963.-PAS-82, N 65.- P. 1-10.
6. **Холмский В.Г., Щербина Ю.В., Сулейманов В.Н.** Точный метод расчета режимов многократно замкнутых электрических сетей при наличии неуравновешенных трансформаторов связи и вольтодобавочных трансформаторов // Энергетика и электротехническая промышленность.-1963.-N 4,5,6.-С. 35-40.
7. **Мельников Н.А.** Метод расчета рабочих режимов для схем, содержащих элемент трансформации с комплексными параметрами // Известия АН СССР. Энергетика и транспорт.-1964.-N 4.-С.427-433.
8. **Мельников Н.А.** Метод расчета рабочих режимов электрических сетей нескольких номинальных напряжений // Известия АН СССР. Энергетика и транспорт.-1965.- N 6.-С. 73-77.
9. **Brown H.E.** Contingencies evaluated by a Z-matrix method // IEEE Transactions.-1969.-V. PAS-88, N 4.-P. 409-412.
10. **Качанова Н.А., Гоголина Л.А.** Учет комплексных коэффициентов трансформации трансформаторов в расчетах установившихся режимов энергосистем.- В кн.: Проблемы технической электродинамики.- 25.-Киев: Наукова думка, 1970.-С. 30-36.
11. **Лопушинская Л.Л.** Алгоритм расчета установившегося режима сложных энергосистем при учете комплексных коэффициентов трансформации трансформаторов.- В кн.: Проблемы технической

- электродинамики.-25.- Киев: Наукова думка, 1970.- С. 64-66.
12. **Бартоломей П.И.** Об учете коэффициента трансформации при расчете режимов электрической сети методом узловых напряжений // Электричество. - 1971. - N 10. - С. 88 - 89.
 13. **Peterson N.M., Meyer W.S.** Automatic adjustment of transformer and phase-shifter taps in the Newton power flow // IEEE Transactions.-1971.-V. PAS-90, N 1.-P.103-108.
 14. **Despotovic S.T., Babic B.S. and Mastilovic V.P.** A rapid and reliable method for solving load-flow problems // IEEE Transactions.-1971.-V. PAS-90, N 1.- P. 123-130.
 15. **Фазылов Х.Ф., Насыров Т.Х., Брискин И.Л.** К расчету установившихся режимов энергосистем с учетом комплексных коэффициентов трансформации трансформаторов // Электричество.-1972.-N 12.- С. 7-9.
 16. **Жуков Л.А., Стратан И.П.** Установившиеся режимы сложных электрических сетей и систем.-М.: Энергия, 1979.- 416с.
 17. **Александров О.И., Домников С.В., Бабкевич Г.Г.** Общая формула потерь мощности в электрических сетях с учетом комплексных коэффициентов трансформации в сетях // Изв. вузов. Энергетика. - 1991. - N 9. - С. 6 - 11.
 18. **Бернас С.С., Цек З.З.** Математические модели элементов электроэнергетических систем.-М.: Энергоиздат, 1982.-313 с.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 17.10.2007.

**Վ.Ս. ԽԱՉԱՏՐՅԱՆ, Ն.Պ. ԲԱԴԱԼՅԱՆ, Մ.Գ. ԹԱՄՐԱԶՅԱՆ, Կ.Վ. ԽԱՉԱՏՐՅԱՆ,
Մ.Ա. ՄՆԱՏԱԿԱՆՅԱՆ, Ս.Է. ԳՐԻԳՈՐՅԱՆ, Ա.Գ. ԴՈՒԼՅԱՆ, Ս.Ա. ԱՊՐՈՅԱՆ**

**ԷԼԵԿՏՐԱԷԼԵՐԳԵՏԻԿԱԿԱՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳԻ ԿԱՅՈՒՆԱՑՎԱԾ ՌԵԺԻՄՆԵՐԻ ՄԱԹԵՄԱՏԻԿԱԿԱՆ
ՄՈՂԵԼՆԵՐԻ ԿԱՌՈՒՑՈՒՄԸ՝ ՀԱՇՎԻ ԱՌՆԵԼՈՎ ՏՐԱՆՏՈՐՄԱՏՈՐՆԵՐԻ ՀԱՄԱԼԻՐ
ՏՐԱՆՏՈՐՄԱՏԻԱՅԻ ԳՈՐԾԱԿԻՑՆԵՐԸ**

Առաջարկվում է ընդհանրացված պասիվ պարամետրերի մատրիցների կառուցումը՝ հաշվի առնելով տրանսֆորմատորների համալիր տրանսֆորմացիայի գործակիցները, որոնք կիրառվում են էլեկտրաէներգետիկական համակարգի կայունացված և այլ ռեժիմների մաթեմատիկական մոդելների կառուցման ժամանակ:

Առանցքային բաներ. պարամետր, տրանսֆորմատոր, մատրից, համակարգ, գործակից, ռեժիմ, հավասարում, մոդել, ֆունկցիա, սխեմա:

**V.S. KHACHATRYAN, N.P. BADALYAN, M.G. TAMRAZIAN, K.V. KHACHATRYAN,
M.A. MNATSAKANYAN, S.E. GRIGORYAN, A.G. GHULYAN, S.A. APROYAN**

**TRANSFORMATION COMPLEX FACTORS ACCOUNT OF TRANSFORMERS AT CONSTRUCTION OF
MATHEMATICAL MODELS OF THE ESTABLISHED MODES OF ELECTROPOWER SYSTEMS**

The method of generalized passive parameters matrix construction in view of complex factors of transformers transformation which are used at construction of mathematical models of established and other modes of electropower systems is proposed.

Keywords: parameter, transformer, matrix, system, factor, mode, equation, model, function, circuit.

В.Г. ПЕТРОСЯН, Т.О. ОВАКИМЯН

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЩЕЛЕВОГО КАНАЛА ДЛЯ РАЗРАБОТКИ, КАЛИБРОВАНИЯ И ТЕСТИРОВАНИЯ СИСТЕМ ДИАГНОСТИКИ ТЕЧИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ АТОМНЫХ РЕАКТОРОВ ТИПА ВВЭР

С целью модернизации методов и средств диагностики течи теплоносителя реакторов типа ВВЭР разработана модель щелевого канала (ЩК) на основе конического сопла. В основе расчетов модели лежит выражение Бернулли для скорости истечения вязкой и несжимаемой жидкости через небольшое отверстие стенки сосуда, находящейся под давлением. Получена формула объемного расхода жидкости через ЩК для случая аппроксимации выходного раскрытия щели к прямоугольнику с учетом коэффициентов гидравлического сопротивления, шероховатости стенок, а также зависимости площади раскрытия щели от длины, следуемой из упруго-пластической теории механики. Модель ЩК может быть использована при разработке средств диагностики, а также при калибровке и тестировании диагностических систем течи теплоносителя.

Ключевые слова: концепция ТПР ("течь перед разрушением"), диагностические системы течи, модель щелевого канала, аппроксимация контура раскрытия щели, коэффициент гидравлического сопротивления, коэффициент шероховатости стен, объемный расход течи.

Введение. В комплексе мероприятий по обеспечению безопасного функционирования атомных реакторов типа ВВЭР важное место отводится диагностическим методам, которые составляют неотъемлемую часть мероприятий, направленных на своевременное предотвращение аварий с образованием сквозных трещин или разрывов в сосудах высокого давления (трубопроводов) и, как следствие, с истечением теплоносителя из главного циркуляционного контура реактора (ГЦК). Эти мероприятия следует организовывать и выполнять в соответствии с идеологией концепции "течь перед разрушением" (ТПР), содержащей ряд основополагающих требований, включающих этапы конструирования, изготовления и эксплуатации трубопроводов под давлением [1,2]. Концепция ТПР требует в обязательном порядке применения чувствительных и надежных диагностических систем течи, способных локализовать течь в главном циркуляционном контуре (ГЦК) реакторной установки (РУ) и подавать сигнал тревоги системе защиты реактора после окончательного подтверждения факта течи.

Диагностические системы течи подразделяются на «интегральные» и «локальные», которые основываются на принципе измерения различных параметров физических явлений, сопутствующих течи.

Интегральные системы предназначены для регистрации факта течи без ее локализации. В частности, на 2-ом энергоблоке Армянской АЭС установлены интегральные системы, измеряющие радиоактивность аэрозолей, влажность и температуру проб воздуха герметических боксов и другие показатели ГЦК и РУ.

Локальные системы, кроме обнаружения факта течи и оценки скорости объемного расхода теплоносителя, определяют также ее место. При этом обычно измеряются: относительная влажность, температура воздуха, уровень высокочастотного акустического шума в корпусе ГЦК, интенсивность теплового инфракрасного излучения и т.д. [3]. Примерами таких систем являются "ALÜS" и "FLÜS" немецкой фирмы "Siemens", построенные на разных физических принципах. Система "ALÜS" реагирует на изменение уровня высокочастотного акустического шума в ГЦК и реакторном корпусе в диапазоне частот 100...400 Гц, вызванного течью теплоносителя из любых неуплотнений или щелевых каналов ГЦК. Отметим, что на 2-ом энергоблоке Армянской АЭС установлена система "СКТТ", аналогичная системе "ALÜS". Опыт эксплуатации СКТТ показывает, что посторонние шумы часто интерпретируются системой как "события". Кроме того, согласно результатам последней инспекции диагностических систем течи Армянской АЭС, отмечается, что система "СКТТ" определяет место течи, но не обеспечивает установленную минимальную чувствительность регистрации скорости течи (3,8 л/мин) [4]. Отметим также, что в литературе отсутствует информация относительно процедуры калибровки чувствительности по течи.

Растущие требования к повышению чувствительности, точности и надежности диагностических систем течи требуют совершенствования диагностических методов и средств. В последнее время ведутся исследования по разработке локальных диагностических систем течи, работающих на принципе измерения относительной влажности проб воздуха, околоповерхностных слоев сосудов давления, отбираемых с помощью перфорированных сенсорных пробоотборных труб, монтируемых под теплоизоляционным слоем труб ГЦК, в подколпачном объеме реактора и в других местах [5,6]. Исследования проводятся на специальном стенде, в состав которого обычно входят: участок трубопровода ГЦК; емкость теплоносителя с адекватными параметрами теплоносителя ВВЭР реактора; узел имитатора ЩК; сенсорные пробоотборники, датчики влажности и температуры; модуль сбора, преобразования, обработки и анализа данных измерений.

Анализ литературы показывает, что в разрабатываемых диагностических системах недостаточно представлена модельная основа узла имитации течи ЩК, хотя она является ключевой для этих систем. Особенно важен вопрос, насколько адекватно модельная щель отображает (имитирует) реальную щель. От этого зависит корректность сравнения результатов эксперимента с реальной ситуацией.

В связи с этим возникла задача разработки математической (геометрической) модели щелевого канала, учитывающей основные параметры ЩК (длину, площадь раскрытия, глубину канала, коэффициенты гидравлического сопротивления и шероховатость стен) с возможностью перестраивания этих параметров. Предлагаемая модель ЩК будет использоваться при тестировании чувствительности к течи существующих диагностических систем, в частности, на 2-ом энергоблоке Армянской АЭС. Она может использоваться также и в других задачах, например, для корректного конструирования имитатора малых течей, используемого при разработке диагностических систем течей на основе анализа относительной влажности проб воздуха ГЦК.

1. Анализ геометрии раскрытия сквозной трещины. В теоретических моделях механики разрушения учитываются различные факторы, влияющие на величину раскрытия сквозных трещин в металлических конструкциях [7]: уровень и распределение напряжений в конструкции, геометрические характеристики элементов, свойства материалов и т.д. В частности, для области упруго-пластических напряжений величина раскрытия щели (в зависимости от координаты x по длине щели) определяется формулой [8]

$$V(x) = \frac{1+k}{8 \pi G} \sigma_F (c+p) \left\{ \cos \varphi \left[\ln \frac{\sin^2(\theta - \varphi)}{\sin^2(\theta + \varphi)} \right] + \cos \theta \left[\ln \frac{(\sin \theta + \sin \varphi)^2}{(\sin \theta - \sin \varphi)^2} \right] \right\}, \quad (1)$$

где $V(x)$ - половина раскрытия щели в точке x вдоль трещины. Коэффициент k выражается через коэффициент Пуассона ν . Для плоско-напряженного состояния $k=(3-\nu)/(1+\nu)$; для условий плоских напряжений $k=3/4$; $G=E/2(1+\nu)$, где E (модуль Юнга; $\theta=\pi\sigma/2\sigma_F$; $p=c[1/\cos\theta]-1$); σ - приложенное напряжение; σ_F - напряжение течения; p - длина пластичной зоны; φ - величина, зависящая от x ; c - половина длины щели. На рис.1 приведен упрощенный вариант щелевого контура.

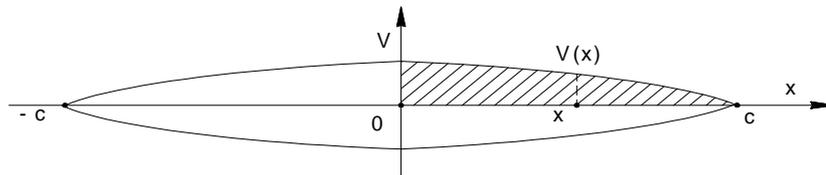


Рис.1. Упрощенный вариант щелевого контура. $V(x)$ – половина раскрытия щели в точке x вдоль трещины. Заштрихованная часть составляет $1/4$ всей площади щели

В силу симметричности контура щели площадь ее раскрытия можно вычислить интегралом

$$A = 4 \int_0^c V(x) dx. \quad (2)$$

При этом предполагается, что центр координат установлен в точке центра тяжести контура щели, ось абсцисс направлена вдоль длины щели, а ось ординат (в поперечном направлении. $V(x)$ определяется выражением (1); c - половина длины щели ($c=l/2$); 0 - координата центра тяжести щели.

В табл. 1 представлены результаты вычислений площади раскрытия щели S_0 в зависимости от ее длины l_0 на основе формул (1) и (2) для двух значений давлений [7].

Приведенные данные показывают, что площадь раскрытия щели растет по степенному закону при возрастании ее длины. Эту закономерность далее будем называть зависимостью “ $l_0 - S_0$ ”.

Таблица 1

Вычисленные значения площади раскрытия щели
в зависимости от длины для двух значений давления

$l_0, \text{мм}$	16	32	48	64	80	96	112	128	144	160	176	192
$S_0, \text{мм}^2$ 12,5 МПа	0,8	3,4	8,5	17	30,2	50	77	115	164	229	317	413
$S_0, \text{мм}^2$ 17,5 МПа	2,0	4,8	13	23,8	44	70	109	161	230	321	430	578

2. Расчет расхода жидкости через щелевой канал. Для теоретического решения задачи расчета расхода жидкости через ЩК обратимся к выражению Бернулли для скорости $v(\text{м/с})$ истечения вязкой и несжимаемой жидкости сквозь небольшое отверстие на стене сосуда давления [9]:

$$v = \frac{1}{\sqrt{1+\xi}} \sqrt{\frac{2 \Delta P}{\rho}}, \quad (3)$$

где $\Delta P(\text{Па})$ - разность давлений жидкости в сосуде и внешней среде; $\rho(\text{кг/м}^3)$ - плотность жидкости; ξ - безразмерный коэффициент гидравлического сопротивления, который обычно представляется суммой двух членов:

$$\xi = \xi_M + \xi_{\text{тр}}; \quad (4)$$

ξ_M - коэффициент входного сопротивления, обусловленный входной геометрией сопла; $\xi_{\text{тр}}$ - коэффициент сопротивления, обусловленный вязкими свойствами жидкости.

Вычисления показывают, что для труб Ду500 истечения теплоносителя из щелей размерами в пределах 32...192 мм, в условиях давления жидкости 12,5 МПа, соответствующие числа Рейнольдса изменяются в пределах $0,15 \cdot 10^5 \dots 3,42 \cdot 10^5$, что выражает турбулентный характер истечения. Коэффициент трения $\xi_{\text{тр}}$ для такого режима гидродинамического течения определяется формулой Дарси-Вайсбаха

$$\xi = \mu h_0 / D_0, \quad (5)$$

где D_0 - эквивалентный диаметр круглой трубки; h_0 - длина трубки; μ - коэффициент, который в общем случае зависит от диаметра, степени шероховатости стенок и числа Рейнольдса для трубки. Отметим, что для коэффициента μ предложены разные полуэмпирические формулы в зависимости от степени шероховатости.

Для случая шероховатости стенок трубы, значительно отличающейся от «песочной» шероховатости, предлагается формула

$$\mu = \frac{\Delta}{z D_0}, \quad (6)$$

где коэффициент z принимается равным единице для каналов, у которых глубина h_0 много больше ширины (в частности, для труб Ду500 $h_0=32 \text{ мм}$); Δ - эквивалентная шероховатость,

величину которой окончательно можно будет установить экспериментально. Ясно, что численные значения μ для заданного значения D_0 будут меняться в зависимости от эквивалентной шероховатости.

Поместим начало координат x и y в центре тяжести раскрытия щели, направив ось x по длине щели, а y - в поперечном направлении в плоскости раскрытия. Из-за симметричности контура раскрытия щели будем рассматривать только ее первую четверть (она показана на рис.1 штриховкой). Истечение жидкости через щель можно представить как сумму истечений жидкости через элементарные трубочки, заполняющие щель. Поэтому объемный расход жидкости через такую щель с площадью раскрытия B можно оценить интегралом

$$Q = \epsilon \int_B v \, ds, \quad (7)$$

где ds и v - соответственно площадь сечения элементарной трубки и скорость истечения жидкости из нее. Интегрирование производится по сечению раскрытия щели B , а ϵ описывает явление сжатия струи [9].

Разобьем такую щель вдоль оси x на элементарные щели шириной dx . Так как величина раскрытия щели в точке x определяется значением функции $V(x)$ в этой точке, то площадь элементарной щели будет $ds=V(x)dx$, а соответствующий ей эквивалентный диаметр трубочки - $V(x)$.

Подставляя выражение (6) в (5) и заменив диаметр трубки D_0 значением раскрытия щели в точке x , для коэффициента трения получим

$$\xi_{\text{тр}} = h_0 \Delta / V^2(x). \quad (8)$$

Подставляя это выражение в формулу (4), затем полученное (в (3) и, наконец, (3) в (7), принимая для простоты $\epsilon=1$, окончательно получим выражение для объемного расхода вытекающей жидкости из полного щелевого канала, выходной контур которого описывается функцией $V(x)$

$$Q(\Delta) = \sqrt{\frac{2 \Delta P}{\rho}} \int_0^{l/2} \frac{4 V^2(x) dx}{\sqrt{(1 + \xi_M) V^2(x) + h_0 \Delta}}. \quad (9)$$

Контур раскрытия щели $V(x)$ можно с достаточной точностью аппроксимировать к эллипсу, трапеции или к прямоугольнику (рис.2). Напомним, что начало координатных осей x - y находится в центре тяжести кривых, а ось x направлена вдоль длины щели.

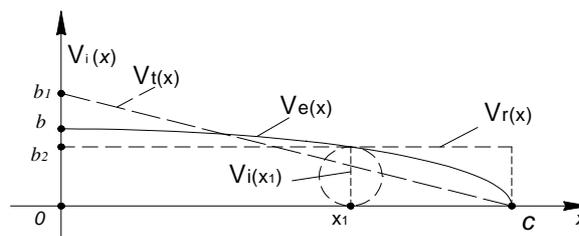


Рис.2. Схематическое представление одной четверти контуров щелей для трех аппроксимаций. $V_i(x_1)$ - половина ширины щели i -го контура в некоторой точке x_1 щели; кругом схематически показано сечение соответствующей элементарной трубочки для этой точки. $V_e(x)$ - эллиптический контур (сплошная линия); $V_r(x)$ - прямоугольный контур (прерывистая линия) и $V_t(x)$ - трапециевидный контур

Если предположить, что независимо от формы выходного раскрытия все щели имеют одинаковую длину и подчиняются зависимости " l_0-S_0 ", то соответствующие аналитические выражения для контуров эллиптического $V_e(x)$, трапециевидного $V_t(x)$ и прямоугольного $V_r(x)$ контуров будут

$$V_e(x) = b \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}}; \quad V_t(x) = b_1 (1 - x/a); \quad V_r(x) = b_2, \quad (10)$$

где $a=l/2$, $b=2S/\pi \cdot l$ и $S=\pi \cdot a \cdot b$ -соответственно полуоси и площадь эллипса $b_1=S/l$ – половина малой диагонали трапеции; $b_2=S/2$ (половина ширины прямоугольника; l (длина щели.

Результаты вычислений объемных расходов жидкости Q_e , Q_t и Q_r по формуле (9), соответственно, для вышеуказанных трех аппроксимаций контура $V(x)$ щели в зависимости от величины шероховатости Δ , дают весьма близкие результаты. В частности, для случая щелей с эллиптическим $V_e(x)$ и прямоугольным $V_r(x)$ контурами, при постоянной глубине щелевого канала 32 мм, относительная ошибка, вычисленная формулой $100 \cdot (Q_e - Q_r) / Q_r$, не превышает 7,3% даже при весьма больших значениях шероховатости ($\Delta \sim 0,1$ мм). Причем с ростом длины щели ошибка уменьшается.

Из вышесказанных рассуждений, приведенных в п.2, следует, что можно с достаточной точностью моделировать сквозную щель сосудов, находящихся под давлением, а также явление течи теплоносителя через щелевой канал, моделируя ее раскрытие прямоугольным контуром.

4. **Анализ геометрической модели ЩК с прямоугольным контуром.** С технической точки зрения могут быть различные решения для вышеуказанной модели. Одно из них – применение конструкции на основе конического сопла. Схематически такой щелевой канал представлен на рис.3.

5.

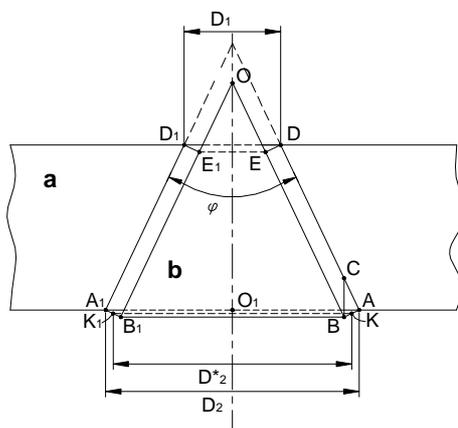


Рис. 3. Схематическое изображение конического щелевого канала: а - неподвижное коническое сопло; б- подвижная коническая вставка; $AA_1 = D_2$ и $DD_1 = D_1$ - соответственно диаметры выходного и входного раскрытий ЩК; $BC = \lambda$ - величина смещения вставки б вдоль оси симметрии OO_1 ; $ABED$ и $A_1B_1E_1D_1$ - осевые срезы ЩК; $\delta = AB = A_1B_1$ - ширина выходного щелевого раскрытия; D^*_2 - средний диаметр выходного раскрытия канала

Щелевой канал образуется при внедрении в неподвижное сопло AA_1D_1D , с углом вершины φ подвижной конической вставки BB_1O с таким же углом вершины, смещенной на небольшую величину $BC=\lambda$ вдоль общей оси симметрии OO_1 . При этом длина образовавшегося щелевого канала не зависит от λ , а выходное раскрытие канала представляет собой коническую поверхность вращения.

Оценка конструктивных параметров модели ЩК выполнена в приложении 1.

Результаты оценки систематизированы в табл. 2, где представлены также рассчитанные по формуле (9) величины объемного расхода течи для значений констант $\Delta_{\text{экв}}=0,005$ и $\xi_M=1$.

Таблица 2
Оценка конструктивных параметров модельного ЩК,
выполненная на основе (I_0-S_0) связи

$l_0, \text{ мм}$	$S_0, \text{ мм}^2$	$D_2, \text{ мм}$	$\varphi, \text{ град}$	$\varphi^*, \text{ град}$	$\lambda_m, \text{ мм}$	$Q, \text{ м}^3/\text{с}$
16,000	0,800	5,093	9,129	4,564	1,256	$5,558 \cdot 10^{-6}$
32,000	3,430	10,186	18,316	9,158	1,343	$5,073 \cdot 10^{-5}$
48,000	8,500	15,279	27,623	13,812	1,473	$2,046 \cdot 10^{-4}$
64,000	17,030	20,372	37,121	18,561	1,650	$5,986 \cdot 10^{-4}$
80,000	30,200	25,465	46,892	23,446	1,858	$1,435 \cdot 10^{-3}$
96,000	49,730	30,558	57,040	28,520	2,103	$3,010 \cdot 10^{-3}$
112,000	77,000	35,651	67,703	33,851	2,361	$5,589 \cdot 10^{-3}$
128,000	115,000	40,744	79,080	39,540	2,656	$9,565 \cdot 10^{-3}$
144,000	164,000	45,837	91,483	45,741	2,930	$1,500 \cdot 10^{-3}$

Как видно из результатов табл. 2, величина расхода Q растет по степенному закону при возрастании величины λ . Отметим, что можно значительно повлиять на величину Q через изменение параметров ξ_M и $\Delta_{\text{экв}}$.

Таким образом, предлагаемая модель щелевого канала на основе конического сопла дает возможность:

- адекватно представлять основные физические характеристики реального щелевого канала, а также основную теоретическую зависимость между длиной и площадью раскрытия ЩК;
- четко и обоснованно конструировать узел имитатора протечек с модельным ЩК для использования его в стендовых исследованиях;
- разработать физические средства для систем диагностики мониторинга течи теплоносителя с применением метода физического моделирования исследуемого объекта (напр., участок трубопровода ГЦК);
- калибровать чувствительные элементы и каналы диагностических систем течи для решения прямой диагностической задачи определения величины течи.

Оценка конструктивных параметров модели ЩК

Средний диаметр выходного щелевого канала ($D^* = D_2 - \lambda/2 \cdot \sin\varphi$ определяет длину эквивалентной прямоугольной щели $I_r = \pi \cdot (D_2 - \lambda/2) \cdot \sin\varphi$), которую при $\lambda/D_2 < 1$ приближенно можно рассчитать формулой - $I_r^* \approx \pi \cdot D_2$, где D_2 – диаметр выходного раскрытия конического неподвижного сопла. При этом площадь поверхности эквивалентной прямоугольной щели определяется соотношением

$$S_r \approx \pi \cdot D_2 \cdot \lambda \cdot \sin(\varphi/2). \quad (11)$$

Из рис.2 следует выражение для угла вершины конусов

$$\varphi = 2 \arcsin [D_2 (1-P) / 2 h_0], \quad (12)$$

где $P = D_1/D_2$. Практически в качестве значения угла вершины конусов можно использовать среднее значение между соответствующими крайними значениями при $P=1$ и $P=0$:

$$\varphi^* = (\varphi_1 + \varphi_2)/2 = \arcsin [D_2 / 2h_0]. \quad (13)$$

Подставляя в формулу (9) вместо $Vr(x) = b_2$ эквивалентную величину для конического сопла $\delta = \lambda \cdot \sin(\varphi/2)$ и учитывая, что $I_r \approx \pi \cdot D_2$, получим выражение для оценки объемного расхода жидкости, вытекающего из ЩК;

$$Q_s(\Delta) = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho} \frac{\pi D_2 \lambda^2 \sin^2(\varphi/2)}{\sqrt{(1+\xi_M)\lambda^2 \sin^2(\varphi/2) + 4h_0\Delta_{эkv}}}}. \quad (14)$$

Перечислим последовательность моделирования ЩК:

1. Прежде всего по табл.1 выбирается определенная пара значений (I_0, S_0) для теоретической щели в соответствии с зависимостью “ I_0-S_0 ”.
2. Определяется длина эквивалентной прямоугольной щели формулой $I_r^* \approx \pi \cdot D_2$, где D_2 – выходной диаметр неподвижного конического сопла ЩК.
3. По формуле (13) вычисляется угол φ при вершине неподвижного конического сопла.
4. Выбираются коэффициенты $\Delta_{эkv}$ и ξ_M соответственно для шероховатости поверхностей щелевого канала и его гидравлического сопротивления.
5. Адекватность теоретической и модельной щелей обеспечивается установлением величины смещения подвижной вставки относительно неподвижного сопла формулой $\lambda_M = S_0 / \pi \cdot D_2 (\sin(\varphi^*/2))$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Irwin G.R., Brawley J.E.** Progress in the development of the crack toughness fracture tests // Materialprüfung. - 1962. – Vol.4. – P.1-11.
2. **US NRC Standard review plan**, 3.6.3 Leak Before Bread evaluation procedures, USNRC, Washington, DC, 1986.
3. **Leak Detection and Monitoring Systems**. Ageing Phenomena and Diagnostics for PWR-Type Reactors // IAEA Interregional Training course 25 November-13 December 1996, Siemens AG, Erlangen, Germany, 1996. – P.1-52.
4. **Technical Report**. Project A1.01/00A-Lot2; LBB Application to Armenia NPP Unit 2. Definition of new Leak Detection System (LDS) configuration. Deliverable 5, Rev1. April 2005, Part 2.

5. **Moisture Leakage Monitoring System "FLBS".** Ageing Phenomena and Diagnostics for PWR-Type Reactors // IAEA Interregional Training course 25 November-13 December 1996, Siemens AG, Erlangen, Germany, 1996.– P. 20-22.
6. **Документация по разработке системы обнаружения течи по влажности** СОРТВ для АЭС типа ВВЭР-440/В-179. – М., 2004. Документация получена от разработчиков ВНИИАЭС по нашей просьбе.
7. **Гетман А.Ф.** Концепция безопасности "Течь перед разрушением для сосудов и трубопроводов давления АЭС". – М.: Энергоатомиздат, 1999. – 258 с. –ISBN 5-283-031151-9. См. литературу в разделе 1.6 книги.
8. **Dugdale D.S.** // J. Mech. Phys. Solids. –1960. –Vol.8. – P. 100-104.
9. **Емцов. Б.Т.** Техническая гидромеханика. – М.: Машиностроение, 1978. –463с.
10. **Альтшуль А.Д.** Гидравлические сопротивления. – М.: Физматгиз, 1960. –82с. НИИ «Арматом». Материал поступил в редакцию 10.06. 2007.

Վ.Գ. ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ, Տ.Հ. ՀՈՎԱԿԻՄՅԱՆ

ՃԵՂՔԱՅԻՆ ԿԱՆԱԼԻ ՄԱԹԵՄԱՏԻԿԱԿԱՆ ՄՈՂԵԼ ՋՋԷՌ ՏԻՊԻ ԱՏՈՄԱՅԻՆ ՌԵԱԿՏՈՐՆԵՐԻ ՋԵՐՄԱԿՐԻ ԱՐՏԱՀՈՍՔԻ ԱՆՏՈՐՈՇԻՉ ՀԱՄԱԿԱՐԳԵՐԻ ՄՇԱԿՄԱՆ, ԶԱՓԱԲԵՐՄԱՆ ԵՎ ԹԵՍԹԱՎՈՐՄԱՆ ՀԱՄԱՐ

ՋՋԷՌ տիպի ատոմային ռեակտորի ջերմակրի արտահոսքի ախտորոշիչ մեթոդների եւ միջոցների կատարելագործման նպատակով մշակվել է ճեղքային կանալի մոդել՝ կոնական փողրակի հիման վրա: Մոդելի հաշվարկների հիմքում դրված է ճնշման անոթի փոքր անցքից անսեղմելի եւ մածուցիկ հեղուկի արտահոսքի արագության Բեռնուլու բանաձեւը: Ստացվել է մոդելային կանալով հեղուկի արտահոսքի ծավալային ծախսի բանաձեւը՝ մոտարկելով ճեղքի ելքային բացվածքի ուրվագիծը ուղղանկյունով, հաշվի առնելով ճեղքի հիդրավլիկ դիմադրության, մակերեսային խորոգորությունների գործակիցները, ինչպես նաեւ մեխանիկայի առաձգականության-պլաստիկության տեսությունից հետևող ճեղքի բացվածքի երկարության եւ մակերեսի միջեւ կապը:

Առանցքային բանեք. արտահոսք փուլումից առաջ՝ հայեցակարգ, արտահոսքի ախտորոշիչ համակարգեր, ճեղքային կանալի մոդել, ճեղքի բացվածքի մոտարկում, հիդրավլիկ դիմադրության գործակից, ճեղքի մակերեսային խորոգորություններ, արտահոսքի ծավալային ծախս:

V.G. PETROSYAN, T.H. HOVAKIMYAN

CRACK-OPENING CHANNEL OF MATHEMATICAL MODEL FOR TASKS OF DEVELOPING, CALIBRATING AND TESTING OF COOLANT LEAK DIAGNOSTICS SYSTEMS OF WWER-TYPE NUCLEAR REACTORS

With the purpose to improve coolant-leaks diagnostics methods of WWER-types' nuclear reactors, the crack-opened channel model based on the conical nozzle is developed. Bernoulli's formula for velocity of viscous and incompressible liquid leak through a small hole of pressure vessel underlies the model's calculations. The working formula of leak volume-rate is received for the case of approximation of the crack-opening area to the rectangle. The factors of hydraulic resistance, surface roughness and the ratio between crack's length and crack-opening area, from elastic-plastic mechanics theory, are taken into account in the formula.

Keywords: LBB (leak before break) conception, leak diagnostic systems, crack-opened area model, crack-open area approximation, hydraulic resistance coefficient, crack surface roughness, leak volumetric rate.

В.О. САРКИСЯН

ВЛИЯНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПЛЕКСНОЙ НАГРУЗКИ НА ПОТЕРИ МОЩНОСТИ В РАДИАЛЬНЫХ СЕТЯХ

Исследованы вопросы влияния изменения напряжения питающего (балансирующего) узла на величину потерь активной мощности в радиальных сетях при различных статических характеристиках комплексной нагрузки. Показано, что при расчетах установившихся режимов распределительных (радиальных) сетей моделирование нагрузки статическими характеристиками по напряжению повышает степень адекватности результатов расчетов реальным величинам. При этом наибольшее влияние на потери мощности в питающей линии оказывает двигательная составляющая комплексной нагрузки.

Ключевые слова: комплексная нагрузка, радиальные сети, потеря мощности, напряжение питающего узла, статические характеристики.

В условиях рыночных отношений в энергетике, когда процесс непрерывного снижения потерь электроэнергии в сетях всех уровней напряжения наряду с другими мероприятиями является востребованным, возникает необходимость более полного выявления и учета всех факторов, влияющих на величину потерь электроэнергии. К одним из таких факторов относятся характеристики различных типов нагрузок в узлах потребления [1].

Асинхронные и синхронные двигатели, осветительные и бытовые установки, электрические печи и прочие электроприемники образуют комплексную нагрузку в узлах электрической сети. Способы представления нагрузок при расчетах режимов зависят от вида сети и целей расчета. Известно, что нагрузки могут моделироваться различными способами: динамическими, статическими характеристиками, постоянными сопротивлениями и мощностями [1-3]. При расчетах установившихся режимов питающих и иногда распределительных сетей среднего напряжения нагрузка может задаваться постоянной мощностью $P_c = \text{const}$, $Q_c = \text{const}$. Задание постоянной мощности нагрузки соответствует многолетней практике эксплуатации электрических сетей и систем. Этот способ задания нагрузки является достаточным для электрических систем, полностью обеспеченных устройствами регулирования напряжения. В этих условиях при изменениях режима сети напряжение на нагрузке практически не меняется и полная мощность нагрузки остается постоянной.

В действительности у потребителей не обеспечивается поддержание постоянного напряжения. В этом случае задание постоянной мощности нагрузки потребителей приводит к ошибкам при расчетах установившихся режимов питающих сетей, в том числе при решении их оптимизационных задач. Ошибка тем больше, чем больше отличаются напряжения потребителей от номинального [2].

Задание нагрузки постоянной проводимостью или постоянным сопротивлением эквивалентно заданию статических характеристик нагрузки в виде квадратичных зависимостей от напряжения. Статические характеристики нагрузок по напряжению более полно отражают свойства нагрузки и не приводят к усложнению расчетов. Во многих случаях эти характеристики не известны, и возможно применение лишь типовых. Учет статических характеристик по напряжению оказывает существенное влияние на результаты расчета послеаварийных установившихся режимов, когда напряжение сильно отличается от номинального.

В данной работе для исследования вопроса влияния характеристики нагрузки на величину расчетных потерь электроэнергии в линии электропередачи была смоделирована радиальная электрическая сеть (рис. 1), параметры пассивных элементов которой приняты постоянными. Расчеты проведены по разработанной автором программе в среде Excel.

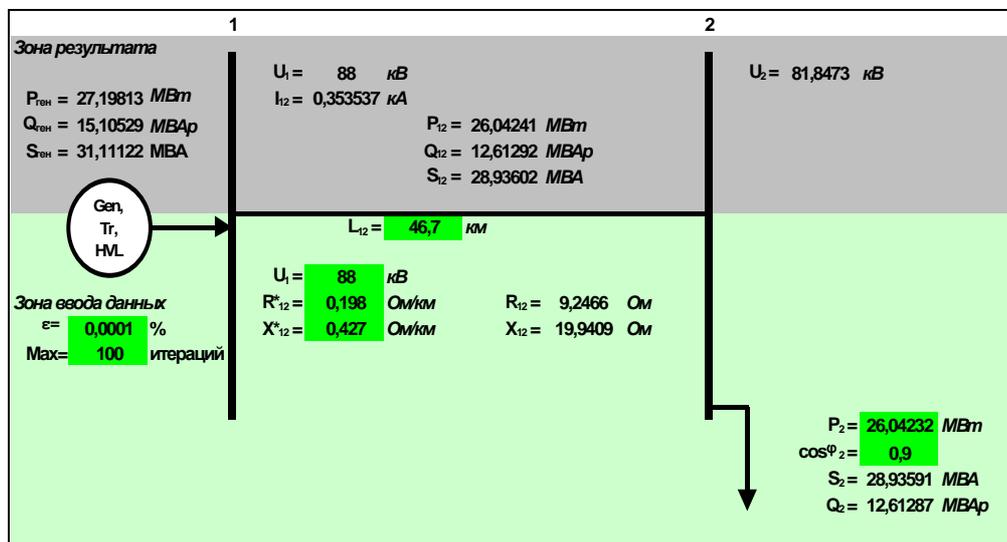


Рис. 1. Схема участка радиальной сети (“Gen/Tr/HVL” – обозначение источника питания, который может быть генератором, трансформатором или ЛЭП)

Исследования проводились на примере одноцепной ВЛ-110 кВ “Зангезур” Армянской ЭЭС с маркой провода АС-150, длина которой составляет 46,7 км. Номинальная нагрузка узла принята 35 МВт (в максимальном режиме). Выбор данной ЛЭП обусловлен тем, что ее пассивные параметры достаточно характерны для сети 110 кВ Армянской энергосистемы.

Потери в данной ВЛ рассчитаны программой для следующих типов нагрузок P_c (во всех расчетах $\cos \varphi = 0,9 = \text{const}$):

1. $P_c(U) = \text{const}$ – потребляемая активная мощность нагрузки неизменна и не зависит от величины напряжения в узле питания. Обычно принято считать, что такой характеристикой обладает двигательная нагрузка.

2. $P_c(U) = P_{\text{ном}} \left(\frac{U}{U_{\text{ном}}} \right)^{1,6}$ – потребляемая активная мощность нагрузки зависит от напряжения в степени 1,6. Такой зависимостью характеризуются осветительные установки.
3. $P_c(U) = P_{\text{ном}} \left(\frac{U}{U_{\text{ном}}} \right)^2$ – потребляемая активная мощность нагрузки находится в квадратичной зависимости от напряжения. Такой характеристикой обладает печная нагрузка.
4. $P_c(U) = P_{\text{ном}} \left(\frac{U}{U_{\text{ном}}} \right)$ – потребляемая активная мощность нагрузки прямо пропорциональна величине напряжения. Эта характеристика смоделирована в программе только для проведения, в случае необходимости, дополнительных сравнительных исследований и в данной работе не рассматривается.

Результаты расчетов потерь активной мощности в питающей ЛЭП от изменения напряжения в узле питания (узел 1 на рис.1) в пределах $U^* = \frac{U}{U_{\text{ном}}} = 0,8 \dots 1,2$ (отн. ед.) обобщены графически на рис. 2 - 4.

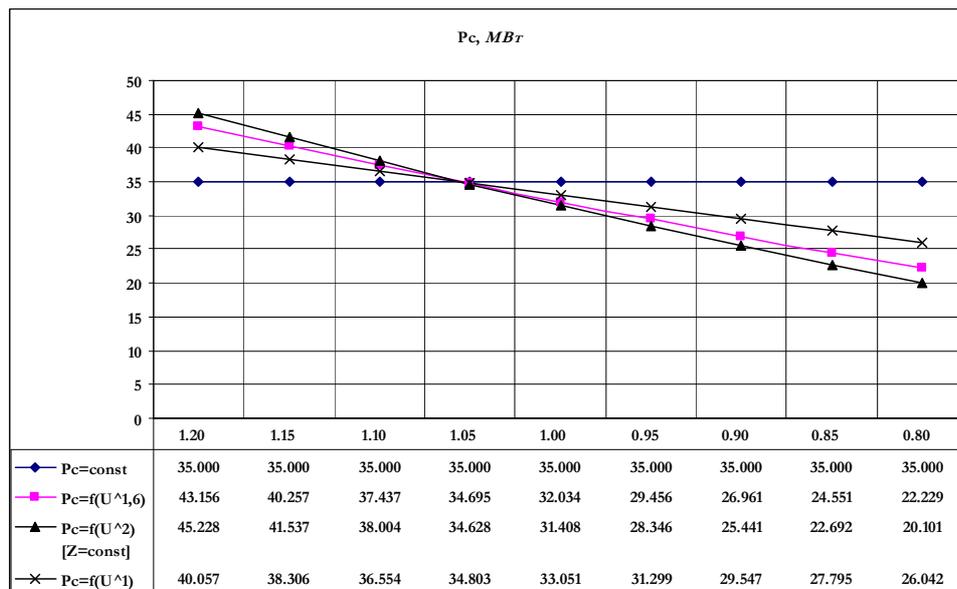


Рис. 2. Зависимость потребляемой мощности (МВт) от изменения величины напряжения (отн. ед.) в узле питания

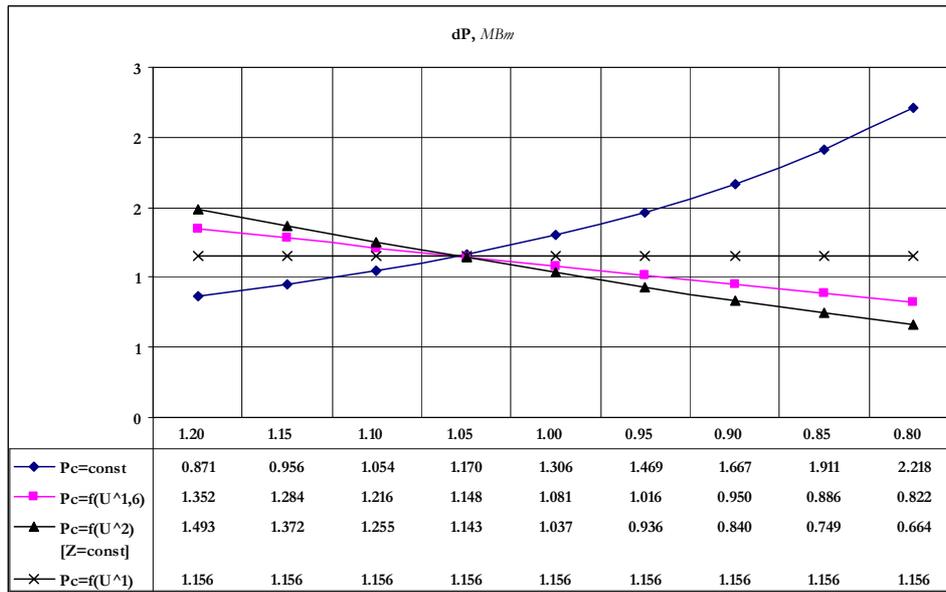


Рис. 3. Зависимость потерь активной мощности в линии (МВт) от изменения величины напряжения (отн. ед.)

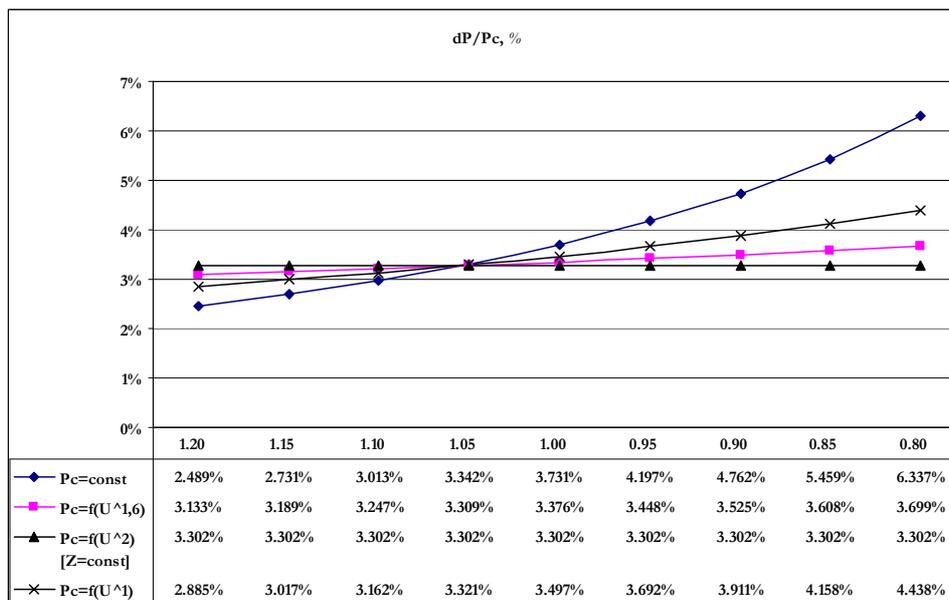


Рис. 4. Зависимость потерь активной мощности в линии (%), приведенной к мощности потребления нагрузочного узла, от изменения величины напряжения (отн. ед.)

Исследования показывают, что учет статических характеристик нагрузки по напряжению приводит к коррекции расчетных величин потерь мощности (электроэнергии) в радиальных сетях (для рассмотренного примера – в пределах $(-3,0 \dots +0,8)\%$ от потребляемой мощности).

При росте напряжения относительная величина потерь, приведенная к потребляемой мощности в узле, для всех типов нагрузки снижается, за исключением нагрузки с характеристикой 1-го типа ($P_c(U) \sim U^2$ – печная), которая остается неизменной. При этом снижение потерь наиболее заметно происходит для двигательной нагрузки ($P_c(U) = \text{const}$).

В то же время растет абсолютная величина потребляемой мощности (энергии) для всех типов нагрузок, за исключением двигательной. Для 2-го ($P_c(U) \sim U^2$) и 3-го ($P_c(U) \sim U^2$) типов нагрузок растут также абсолютные значения потерь электроэнергии в ВЛ, а для нагрузки типа $P_c(U) = \text{const}$ наблюдается их снижение.

В связи с этим приходится констатировать, что в узлах энергосистемы с преобладанием печной и осветительной нагрузок рост напряжения приводит к увеличению абсолютных значений как потребляемой мощности, так и потерь в питающих ЛЭП, что, в конечном счете, приводит к необходимости большей выработки электроэнергии на тепловых станциях (из-за чего ухудшаются также экологические показатели) и, как следствие, к увеличению потребности в импортируемых энергоносителях. Это, в свою очередь, снижает уровень энергетической безопасности страны с одной стороны и является тормозящим фактором энергосбережения – с другой. Компромиссным (в некоторой степени сбалансированным) решением такой проблемы, на первый взгляд, может явиться обеспечение режимных параметров сети, возможно близких к номинальным.

Выявление степени воздействия составляющих комплексной нагрузки узла на потери электроэнергии в питающей линии проведено на основе теории планирования экспериментов [4]. При этом нагрузка была представлена суммой трех составляющих с некоторыми долевыми коэффициентами А, В и С:

$$\begin{cases} P_c(U) = \left[A + B \cdot \left(\frac{U}{U_{\text{ном}}} \right)^{1,6} + C \cdot \left(\frac{U}{U_{\text{ном}}} \right)^2 \right] \cdot P_{\text{ном}} \\ A + B + C = 1, \end{cases} \quad (1)$$

где А, В, С – соответственно доля двигательной, осветительной, печной нагрузок; $P_{\text{ном}} = 35 \text{ МВт}$ – номинальная мощность нагрузки.

Функцией отклика является величина потерь активной мощности ΔP в питающей ЛЭП в зависимости от потребляемой мощности нагрузки P_c :

$$\Delta P = f(P_c). \quad (2)$$

В качестве независимых факторов приняты А и С, поскольку они являются долями составляющих, являющихся граничными по чувствительности к изменению напряжения.

Проведен полный факторный эксперимент, т.е. $2^2 = 4$ расчета, в соответствии с применяемой в теории планирования экспериментов матрицей планирования [3] (см. табл.).

Таблица

Матрица планирования факторного эксперимента

Фактор	A	C	$\Delta P, \text{ МВт}$
Максимальный уровень	0,4	0,5	
Минимальный уровень	0,2	0,2	
Расчет ¹ 1	+	+	1,1382
Расчет ¹ 2	-	+	1,0975
Расчет ¹ 3	+	-	1,1532
Расчет ¹ 4	-	-	1,1117

По данным таблицы составлено регрессионное уравнение (3) с учетом парного взаимодействия факторов A и C:

$$\Delta P = 1,125152 + 0,020589 \cdot A - 0,007297 \cdot C - 0,00020 \cdot A \cdot C. \quad (3)$$

При 1%-й дисперсии ошибки опыта, после исключения из рассмотрения незначущих факторов, окончательно получено следующее упрощенное регрессионное уравнение, адекватность которого подтверждена сравнением табличных и расчетных значений критерия Фишера:

$$\Delta P = 1,125152 + 0,020589 \cdot A. \quad (4)$$

Как следует из анализа полученных результатов и, в частности, из (4), существенное влияние на величину потерь в питающей линии от изменения напряжения оказывает доля двигательной нагрузки (порядка +1,8%). Влияние же других составляющих не превышает порядка -0,7% для печной нагрузки и +0,2% – для осветительной.

Таким образом, необходимость учета статических характеристик комплексной нагрузки (или ее отдельных составляющих) зависит от сопоставимости точности расчетов режимов радиальных сетей и величины поправок, вводимых характеристиками нагрузок.

ВЫВОДЫ

1. Моделирование нагрузки статическими характеристиками по напряжению может вносить существенную поправку в результаты расчетов потерь в радиальных сетях как в сторону увеличения этих потерь до +1%, так и в сторону их уменьшения до -3% по сравнению с нагрузкой, смоделированной типом $P_c(U) = \text{const}$.
2. Оптимизация режимов сети регулированием напряжения с целью снижения потерь мощности в них дает значительный эффект (до 2%) при наличии узлов потребления с существенным преобладанием двигательной нагрузки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Айрапетян Г.А., Гамбурян К.А., Мурадян Р.Д., Саркисян В.О.** Моделирование комплексной нагрузки с целью учета ее характеристик по частоте и напряжению/ ГЗАО “Институт энергетики”.-Ереван, 1999. – 6 с. – Библиогр.: 4 назв. – Рус. – Деп. в АрмНИИНТИ, 10.12.99, № 12–Ар00.
2. **Идельчик В.И.** Расчеты и оптимизация режимов электрических сетей и систем.–М.: Энергоатомиздат, 1988.–288 с.
3. Экспериментальные исследования режимов энергосистем / **Л.М. Горбунова, М.Г. Портной, Р.С. Рабинович** и др.; Под ред. **С.А. Савалова**.–М.: Энергоатомиздат, 1985.–448 с.
4. **Веников В.А., Веников Г.В.** Теория подобия и моделирования (применительно к задачам электроэнергетики): Учебник для вузов по спец. “Кибернетика электр. систем”. –3-е изд., перераб. и доп. –М.: Высш. шк., 1984. –439 с.

ЗАО “НИИ Энергетики”. Материал поступил в редакцию 10.06.2007.

Վ.Հ. ՍԱՐԳՍՅԱՆ

ՈՒՂԻԱԼ ՑԱՆՑԵՐՈՒՄ ՀԱՄԱԼԻՐ ԲԵՌԻ ԲՆՈՒԹԱԳՐԵՐԻ ԱԶՂԵՑՈՒԹՅՈՒՆԸ ՀՉՈՐՈՒԹՅԱՆ ԿՈՐՄՏԻ ՎՐԱ

Ուսումնասիրված են ռադիալ ցանցերում ակտիվ հզորության կորուստների մեծության վրա սնող (հավասարակշռող) հանգույցի լարման փոփոխման ազդեցության հարցերը՝ համալիր բեռի տարբեր ստատիկ բնութագրերի դեպքում: Ցույց է տրված, որ բաշխիչ (ռադիալ) ցանցերի կայունացած ռեժիմների հաշվարկների ժամանակ բեռի մոդելավորումը ըստ լարման ստատիկ բնութագրերով բարձրացնում է հաշվարկի արդյունքների իրական մեծություններին համարժեքության աստիճանը: Ընդ որում՝ սնող գծում հզորության կորուստների վրա առավել մեծ ազդեցություն է թողնում համալիր բեռի շարժիչային բաղադրիչը:

Առանցքային բառեր. համալիր բեռ, ռադիալ ցանցեր, հզորության կորուստ, սնող հանգույցի լարում, ստատիկ բնութագրեր:

V.H. SARGSYAN

IMPACTS OF COMPLEX LOAD CHARACTERISTICS ON THE LOSSES OF POWER IN RADIAL NETWORKS

The problems of feeding (balancing) node voltage alteration impact on the magnitude of active power losses in the radial networks in the case of different static characteristics of complex loads are studied. It is shown that during the calculations of steady modes of distribution (radial) networks, modelling of the load using static characteristics for voltage raises the degree of equivalence of the calculation results using actual magnitudes. In the meanwhile the moving component of complex load has the greatest impact on the power losses in the feeding lines.

Keywords: complex load, radial networks, loss of power, voltage of feeding node, static characteristics.

Վ.Պ. ԱՌԱՔԵԼՅԱՆ

ԷԼԵԿՏՐԱՀԱՂՈՐԴՄԱՆ ԳԾԻ ՆՈՐ PTL-2 ՄԱԹԵՄԱՏԻԿԱԿԱՆ ՄՈՂԵԼԻ
ՀԶՈՐՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՀԱՎԱՍԱՐՈՒՄՆԵՐ

Առաջարկվում է էլեկտրահաղորդման գծի նոր մոդելի կիրառմամբ գծի ակտիվ և ռեակտիվ հզորությունների հավասարումների կառուցում: Ակտիվ և ռեակտիվ հզորությունների ընդհանրացված բնութագրերը թույլ են տալիս գնահատել էլեկտրաէներգետիկական համակարգերի տեխնիկական և տնտեսական ցուցանիշները:

Առանցքային բառեր. էլեկտրաէներգետիկական համակարգ, էլեկտրահաղորդման գիծ, մոդել, ալիքային դիմադրություն, ակտիվ հզորություն, ռեակտիվ հզորություն, գործակիցներ:

Շուկայական հարաբերությունների պայմաններում կարևորվում է էլեկտրաէներգետիկական համակարգերում տեղի ունեցող տեխնիկական գործընթացների ճիշտ ֆինանսատնտեսական գնահատումը: Այդ տեսանկյունից անհրաժեշտ է, օգտագործելով գիտության և տեխնիկայի զարգացման ժամանակակից տեխնոլոգիաները, կառուցել էլեկտրաէներգետիկական համակարգերի տարրերի նոր մաթեմատիկական մոդելներ և իրացնել դրանք: Էլեկտրահաղորդման գիծը համակարգի ամենատարածված և ամենակարևոր էլեմենտներից է: Էլեկտրահաղորդման գծի ռեժիմի ուսումնասիրության ժամանակ անհրաժեշտ է հաշվի առնել նաև նրա միջհամակարգային ֆունկցիան, որին ոչ մի մրցակցություն չի դիմանում: Էլեկտրահաղորդման գծի ռեժիմի հաշվարկի ժամանակ հաշվի են առնվում հետևյալ առանձնահատկությունները [1].

1. մեծ երկարություններ,
2. բարձր և գերբարձր լարումներ,
3. լարման կարգավորման սարքավորումների առկայություն:

Հետազոտության նպատակն է՝ հաշվի առնելով Հարավային Կովկասում տեղի ունեցող աշխարհաքաղաքական զարգացումները, էներգետիկական ծրագրերը, Հայաստան-Իրան գազատարի շինարարության պայմանագիրը, Հայաստան-Իրան (Ահար-1, Ահար-2) և Հայաստան-Վրաստան (Ալավերդի-2) 220 կՎ լարման էլեկտրահաղորդման գծերի առկայությունը.

1. Ստեղծել և իրացնել էլեկտրական ցանցերի հաշվարկման նոր մեթոդներ:

2. Մոդելավորել էլեկտրաէներգետիկական համակարգերի ռեժիմներ:

Առաջարկվող PTL-2 մաթեմատիկական մոդելի առավելություններն են.

- էլեկտրահաղորդման գծի նոր մոդելի կառուցումը:
- էլեկտրահաղորդման գծի երկրորդային պարամետրերի հաշվարկի նոր մեթոդի կիրառությունը:
- Ծրագրային հեշտ իրացումը:

Էլեկտրական ցանցերի հաշվարկներում լայնորեն տարածված է էլեկտրահաղորդման գծի (-մոդելը [1]:

$$\dot{U}_1 = \dot{K}_{\Pi} \dot{U}_2 + \dot{K}_{\Pi}^Z \cdot \dot{I}_2, \quad (1)$$

$$\dot{I}_1 = \dot{K}_\Pi^Y \dot{U}_2 + \dot{K}_\Pi \dot{I}_2, \quad (2)$$

որտեղ

$$\dot{K}_\Pi = 1 + \frac{Z_q \cdot Y_q}{2}, \quad (3)$$

$$\dot{K}_\Pi^Z = \sqrt{3} \cdot Z_q, \quad (4)$$

$$\dot{K}_\Pi^Y = \frac{1}{\sqrt{3}} \left(Y_q + \frac{Z_q \cdot Y_q^2}{4} \right): \quad (5)$$

Ինչպես հայտնի է, էլեկտրահաղորդման գիծը ներկայացվում է նաև քառաբևեռակ մոդելով [1, 2].

$$\dot{U}_1 = \dot{K}_A \dot{U}_2 + \sqrt{3} \dot{W}_u \dot{K}_B \dot{I}_2, \quad (6)$$

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{K}_C}{\sqrt{3} \dot{W}_u} \dot{U}_2 + \dot{K}_D \dot{I}_2, \quad (7)$$

որտեղ \dot{K}_A -ն, \dot{K}_B -ն \dot{K}_C -ն \dot{K}_D -ն համալիր գործակիցներ են, \dot{W}_u -ն՝ - էլեկտրահաղորդման գծի համալիր ալիքային դիմադրությունը:

Էլեկտրահաղորդման գծի նոր PTL-2 մաթեմատիկական մոդելը ներկայացվում է հետևյալ հավասարումներով [3].

$$\dot{U}_1 = \dot{K}_M \dot{U}_2 + \dot{K}_M^Z \dot{I}_2, \quad (8)$$

$$\dot{I}_1 = \dot{K}_M^Y \dot{U}_2 + \dot{K}_M \dot{I}_2, \quad (9)$$

որտեղ

$$\dot{K}_M = \dot{K}_A = \dot{K}_D, \quad (10)$$

$$\dot{K}_M^Z = \sqrt{3} \dot{W}_u \dot{K}_B, \quad (11)$$

$$\dot{K}_M^Y = \frac{\dot{K}_B}{\sqrt{3} \dot{W}_u}: \quad (12)$$

Էլեկտրահաղորդման գծի երկրորդային պարամետրերը որոշվում են [4] -ում ներկայացված մեթոդներով:

Կառուցենք էլեկտրահաղորդման գծի նոր PTL-2 մաթեմատիկական մոդելի հզորությունների հավասարումները:

$$\dot{S}_1 = \sqrt{3} \dot{U}_1 \dot{I}_1^* \quad (13)$$

(8) և (9) արտահայտությունները տեղադրելով (13) բանաձևում, կստանանք՝

$$S_1 = \sqrt{3}(K_M^* U_2 + K_M^Z I_2)(K_M^Y U_2 + K_M I_2): \quad (14)$$

Էլեկտրահաղորդման գծի մոդելի համալիր գործակիցները ներկայացնելով իրական և կեղծ մասերով, կստանանք՝

$$K_M = K_{Ma} + jK_{Mr}, \quad (15)$$

$$K_M^Z = K_{Ma}^Z + jK_{Mr}^Z, \quad (16)$$

$$K_M^Y = K_{Ma}^Y + jK_{Mr}^Y: \quad (17)$$

K_{Ma} , K_{Mr} , K_{Ma}^Z , K_{Mr}^Z , K_{Ma}^Y և K_{Mr}^Y գործակիցները որոշվում են հետևյալ արտահայտություններով [3].

$$K_{Ma} = ch\alpha_0 l \cdot \cos \beta_0 l, \quad (18)$$

$$K_{Mr} = sh\alpha_0 l \sin \beta_0 l, \quad (19)$$

$$K_{Ma}^Z = -\sqrt{3}Ba, \quad (20)$$

$$K_{Mr}^Z = -\sqrt{3} \cdot Br, \quad (21)$$

$$K_{Ma}^Y = \frac{Ba}{\sqrt{3}W_u^2}, \quad (22)$$

$$K_{Mr}^Y = \frac{Br}{\sqrt{3}W_u^2}, \quad (23)$$

որտեղ α_0 -ն էլեկտրահաղորդման գծի ալիքի մարման գործակիցն է, β_0 -ն՝ էլեկտրահաղորդման գծի ալիքի ֆազային գործակիցը:

(15)-(17) արտահայտությունները տեղադրելով (14)-ում, համապատասխան ձևափոխություններից հետո ակտիվ և ռեակտիվ հզորությունների համար կստանանք.

$$P_1 = K_P^U U_2^2 + K_P^P P_2 - K_P^Q Q_2 + K_P^S \frac{S_2^2}{U_2^2}, \quad (24)$$

$$Q_1 = K_Q^U U_2^2 + K_Q^Q Q_2 + K_Q^P P_2 + K_Q^S \frac{S_2^2}{U_2^2}, \quad (25)$$

որտեղ

$$K_P^U = \sqrt{3}(K_{Ma} K_{Ma}^Y + K_{Mr} K_{Mr}^Y), \quad (26)$$

$$K_P^P = K_{Ma}^{ZY} + K_M^2, \quad (27)$$

$$K_P^Q = K_P^P = K_{Mr}^{ZY}, \quad (28)$$

$$K_P^S = \frac{1}{\sqrt{3}} (K_{Ma}^Z K_{Ma} + K_{Mr}^Z K_{Mr}), \quad (29)$$

$$K_Q^U = \sqrt{3} (K_{Ma} K_{Mr}^Y - K_{Mr} K_{Ma}^Y), \quad (30)$$

$$K_Q^O = K_{Ma}^{ZY} - K_{Mr}^2, \quad (31)$$

$$K_Q^S = \frac{1}{\sqrt{3}} (K_{Ma}^Z K_{Mr} - K_{Mr}^Z K_{Ma}): \quad (32)$$

Հետազոտություններն իրականացվել են Հայաստան-Իրան (Ահար) 220 կՎ լարման էլեկտրահաղորդման գծի նկատմամբ (արդյունքները ներկայացվում են աղյուսակներով):

Աղյուսակ 1

Էլեկտրահաղորդման գծի էլակետային տվյալներ

Կառուցվածքային պարամետրեր		Ռեժիմի պարամետրեր		
Մակնիշ	l [կմ]	U ₂ [կՎ]	P ₂ [ՄՎտ]	Q ₂ [ՄՎար]
ԱՊ-500/64	101,6	220	100	-75

Աղյուսակ 2

Էլեկտրահաղորդման գծի PTL-2 մոդելի գործակիցներ

K _{Ma}	K _{Mr}	K _{Ma} ^Z [ՕՄ]	K _{Mr} ^Z [ՕՄ]	K _{Mr} ^Y 10 ⁻⁴ [ՄՄ]
0,9941	0,0009	11,2063	72,1001	1,6197

Աղյուսակ 3

Էլեկտրահաղորդման գծի PTL-2 մոդելի ակտիվ հզորության ընդհանրացված բնութագիր

K _P ^u 10 ⁻⁷ [ՄՄ]	K _P ^P	K _P ^Q	K _P ^S [ՕՄ]	[P ₁] [ՄՎտ]
2,5218	0,9998	0,0018	6,4768	101,9481

Աղյուսակ 4

Էլեկտրահաղորդման գծի PTL-2 մոդելի ռեակտիվ հզորության ընդհանրացված բնութագիր

K _Q ^u 10 ⁻⁴ [ՄՄ]	K _Q ^Q	K _Q ^P	K _Q ^S [ՕՄ]	[Q ₁] [ՄՎար]
2,7854	-0,9766	0,0018	-41,4246	-72,9567

Եզրակացություն

1. Էլեկտրահաղորդման գծի նոր PTL-2 մոդելի կիրառմամբ գծերի պասիվ և ակտիվ պարամետրերի հաշվարկը համարժեք է Ս-մոդելի հաշվարկին:
2. Էլեկտրահաղորդման գծի նոր PTL-2 մոդելը հնարավորություն է ընձեռում գնահատել թողունակությունը:
3. Էլեկտրահաղորդման գծի նոր PTL-2 մոդելը հնարավորություն է ընձեռում ստանալ ցանկացած լարման և երկարության էլեկտրահաղորդման գծերի հզորությունների ընդհանրացված բնութագրերը:
4. Կազմված համակարգչային C++ ծրագիրն ապահովում է կիրառության լայն սահմաններ և հաշվարկների բարձր ճշտություն:

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. **Веников С.А., Рыжов Ю.П.** Дальние электропередачи переменного и постоянного тока. – М.: Энергоатомиздат, 1985.
2. **Cross C.A.** Power System Analysis. 2 nd edn. - Wiley, New York, 1986.
3. **Առաքելյան Վ.Պ.** Էլեկտրահաղորդման գծերի նոր մաթեմատիկական մոդելի կառուցում // ՀՊՃՀ տարեկան գիտաժողովի նյութերի ժողովածու. - Երևան, 2005. - Էջ 271-273:
4. **Առաքելյան Վ.Պ.** Էլեկտրական ցանցեր: Գործնական աշխատանքներ // ՀՊՃՀ. - Երևան, 1999. – 25 էջ:

ՀՊՃՀ: Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 10.09.2007:

Վ.Ս. ԱՐԱԿԵԼՅԱՆ

УРАВНЕНИЯ МОЩНОСТИ НОВОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ PTL-2 ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Предлагается построение уравнений активной и реактивной мощностей линии с применением новой модели линии электропередачи. Обобщенные характеристики активной и реактивной мощностей позволяют оценить технические и экономические показатели электроэнергетических систем.

Ключевые слова: электроэнергетическая система, линия электропередачи, модель, волновое сопротивление, активная мощность, реактивная мощность, коэффициент.

V.P. ARAKELYAN

POWER EQUATIONS OF NEW PTL-2 MATHEMATICAL MODEL OF TRANSMISSION LINE

Using a new model of a transmission line the construction of power and reactive power equation of a line is proposed. The generalized characteristics of power and reactive power enable to estimate technical and economic parameters of electropower systems.

Keywords: electropower system, transmission line, model, wave resistance, power, reactive power, coefficient.

Ж.М. МИРЗАБЕКЯН

РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ КАБЕЛЕЙ С ЛЕНТОЧНЫМИ ТОКОПРОВОДЯЩИМИ ЖИЛАМИ

Рассматриваются методы расчета электрической емкости и индуктивности кабеля с плоскими токопроводящими жилами. Дается анализ этих расчетов с применением θ -функции. Для плоских жил сечением $1,13 \text{ мм}^2$ рассчитываются активное сопротивление и емкость при частоте 20 кГц .

Ключевые слова. плоский кабель, тета-функция, емкость, индуктивность, симметричное поле относительно экрана.

Введение. Важной проблемой в современной электротехнической промышленности является снижение материалоемкости выпускаемых изделий. Поэтому следует более обоснованно и экономично применять материалы в конструкциях, в том числе в высокочастотных кабелях, где в большом количестве используются дорогостоящие цветные металлы и пластмассы.

Анализ существующих конструкций и параметров передачи высокочастотных кабелей, а также всесторонние теоретические и экспериментальные исследования показывают, что одним из возможных вариантов конструкции, удовлетворяющих выдвинутому требованию, по-видимому, является кабель с прямоугольными ленточными токопроводящими жилами. Исследования показали, что при передаче токов высокой частоты воздействие поверхностного эффекта на активное сопротивление в токопроводящих жилах круглой формы больше, чем в жилах ленточной формы. Это обусловлено глубиной проникновения тока, которого при прямоугольных лентах меньше, чем при круглых проводах. Кроме того, кабели с ленточными токопроводящими жилами обладают следующими преимуществами по сравнению с кабелями цилиндрической формы сечения жил:

- большой теплоотдачей, что дает возможность передавать по таким кабелям большие мощности;
- меньшим весом.

Рассматривается теория определения электрических и магнитных полей кабелей с ленточными токопроводящими жилами, при помощи которых можно легко определить их первичные и вторичные параметры передачи. Излагается метод расчета электромагнитных полей кабелей указанных конструкций, где применен метод зеркальных отображений.

1. Для расчета рабочей емкости кабелей с ленточными жилами рассматривается электрическое поле в кабеле (рис. 1).

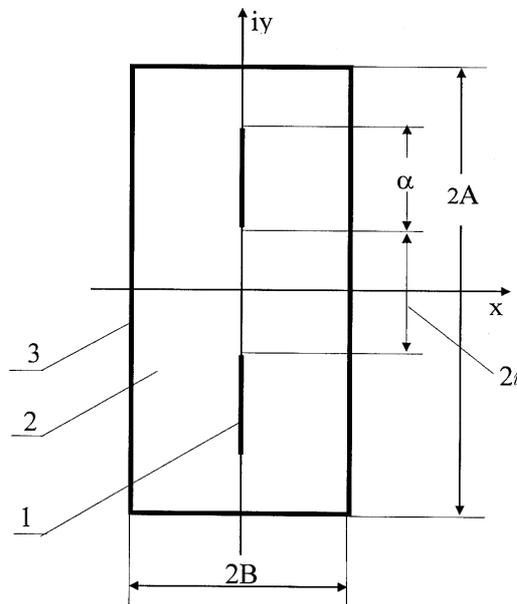


Рис.1.

1 – токопроводящая жила, 2 – диэлектрик, 3 – экран; α - размер жилы (ширина жилы), $2l$ - расстояние между жилами, $2A$ и $2B$ – размеры экрана

В [1] обосновано, что на границе проводник-диэлектрик

$$E_t = 0, \quad (1)$$

где E_t – касательная составляющая поля E .

В соответствии с уравнениями Максвелла [1] напряженность электрического поля в диэлектрике можно определить следующим образом:

$$\text{rot } E = 0, \quad \text{div } E = 0, \quad (2)$$

или в дифференциальной форме:

$$\frac{\partial E_x}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial E_x}{\partial x} + \frac{\partial E_y}{\partial y} = 0. \quad (3)$$

Составляющая E_z отсутствует, так как поле плоское. Система (2) является системой Коши-Римана [2], поэтому функция

$$f(x + iy) = E_x(x, y) + iE_y(x, y) \quad (4)$$

является аналитической функцией переменной $z = x + iy$.

При расчете электрического поля и емкости с достаточной для практики точностью можно предположить, что толщина провода равна нулю. В этом случае пренебрегается

электрическое поле в области I (рис. 2), которая предполагается намного меньше общего объема диэлектрика. Тогда, учитывая условие (1), можно записать:

- на горизонтальной границе экран-диэлектрик:

$$E_x = \operatorname{Re} f(z) = 0; \quad (5)$$

- на вертикальной границе экран – диэлектрик:

$$E_y = \operatorname{Im} f(z) = 0. \quad (6)$$

Функция $\operatorname{Im} f(z)$ - нечетная, $\operatorname{Re} f(z)$ - четная (относительно переменной z), т.е. $\operatorname{Re} f(z) = \operatorname{Re} f(-z)$, $\operatorname{Im} f(z) = -\operatorname{Im} f(-z)$.

Симметрия функции запишется следующим образом:

$$E(x + iy) = -\overline{E(x - iy)}, \quad (7)$$

$$E(x + iy) = -\overline{E(-x + iy)}, \quad (8)$$

где черта сверху означает комплексное сопряжение.

Для решения задачи целесообразно использовать метод зеркального отображения [1, 2], т.е. учесть влияние экрана заменой его на эквивалентную систему бесконечного числа проводов.

Опишем способ такой замены. Через горизонтальный участок экрана $y = A$ функция $f(z)$ аналитически продолжается по формуле

$$f(z) = -\overline{f(\bar{z} + 2iA)} \quad (\text{зеркальное отображение}) \quad (9)$$

в областях $|\operatorname{Re} z| < B$ и $A < \operatorname{Im} z < 3A$.

По аналогичной формуле продолжаем $f(z)$ через горизонтальный участок $y = 3A$ в областях $|\operatorname{Re} z| < B$ и $3A < \operatorname{Im} z < 5A$. В результате получаем функции $f(z)$ в полуполосе $|\operatorname{Re} z| < B$ и $\operatorname{Im} z > 0$, переходя к формуле

$$f(z) = \overline{f(-x + iy)}. \quad (10)$$

Таким образом, получаем функцию $f(z)$, аналитичную в полосе вида $|\operatorname{Re} z| < B$. Функция периодична и имеет период $2A$ (рис.3).

Затем продолжаем функцию через вертикальный участок экрана $|\operatorname{Re} z| < B$, которое с учетом условия (5) примет вид

$$f(z) = \overline{f(-\bar{z} + 2B)} \quad (\text{зеркальное отображение}). \quad (11)$$

Пользуясь приведенными выше рассуждениями, получаем, что функция $f(z)$ аналитична в области, указанной на рис. 3. В этой области функция периодична и имеет период $2A$ по оси y и $4B$ по оси x .

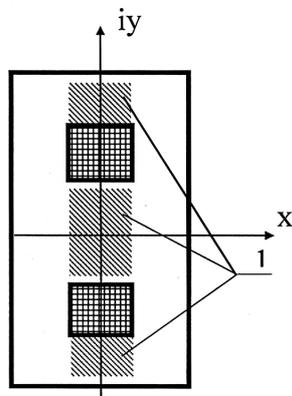


Рис.2

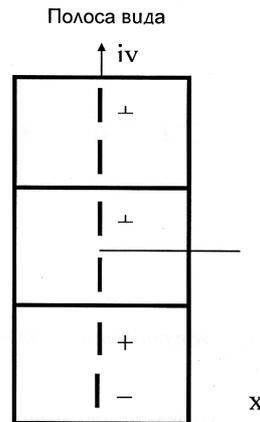


Рис.3

В плоскости имеются участки, где $f(z)$ не аналитична, т.е. участки, где имеются электрические заряды (токопроводящие жилы).

Из соображений четности на проводах имеем

$$f^+(z) = -f^-(z), \tag{12}$$

где $f^+(z)$ - значение $f(z)$ на верхней плоскости провода, а $f^-(z)$ - на нижней.

Такого рода задачи в непериодическом случае рассмотрены в [1] для конечного числа разрезов (проводов). В периодическом случае нужно все возникающие функции заменить на периодические на горизонтальной границе экрана.

В непериодическом случае [3]:

$$f(z) = \frac{C}{\sqrt{(z - i\ell)(z - i\ell - ia)}} = f_1(z) \quad \text{для провода 1,}$$

$$f(z) = \frac{C}{\sqrt{(z + i\ell)(z + i\ell + ia)}} = f_2(z) \quad \text{для провода 2,}$$

где константа C характеризует полный заряд единицы длины провода.

Функция $f(z) = f_1(z) \times f_2(z)$ удовлетворяет условию (12) на обоих проводах.

Однако эта функция не учитывает знака заряда провода (функция нигде не равна нулю). Построим периодическое решение. Укажем, что в одном прямоугольнике период (размером $2A \times 4B$) $f(x, y)$ (т.е. поле E) обращается в нуль в точках $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ (рис. 4).

Этим требованиям удовлетворяет эллиптическая функция, которая выражается через эта-функцию [4].

Решение данной задачи будем искать в виде

$$E = C \sqrt{\frac{\theta_1(z-\alpha)\theta_1(z-\beta)\theta_1(z-\gamma)\theta_1(z-\delta)}{\theta_1(z-ia)\theta_1(z-ia-i\ell)\theta_1(z+ia)\theta_1(z+ia+i\ell)}}, \quad (13)$$

$$\theta_1(z) = \theta_1(z/2B, 2Ai). \quad (14)$$

Покажем, что при соответствующем выборе C функция (13) удовлетворяет условиям (1) и (12).

Преобразуем выражение (13), пользуясь формулами и таблицами, приведенными в [4]:

$$\theta_1(z-\gamma) = \theta_1(z-B) = \theta_1\left(V - \frac{1}{2}\right) = -\theta_2(V),$$

где

$$V = z/2B,$$

$$\theta_1(z-\alpha) = \theta_1(z+B) = \theta_1(V+1/2) = -\theta_2(V),$$

$$\theta_1(z-\delta) = \theta_1(z-iA+B) = \theta_1(V-1/2-\tau/2) =$$

$$= e^{-i\pi(V+\tau/4)} e^{i\pi(2V+\tau)} \theta_3(V) = e^{i\pi(V+3/4+\tau)} \theta_3(V),$$

$$\theta_1(z-\beta) = \theta_1(V+1/2+\tau/2) = e^{-i\pi(V+\tau/4)} \theta_3(V).$$

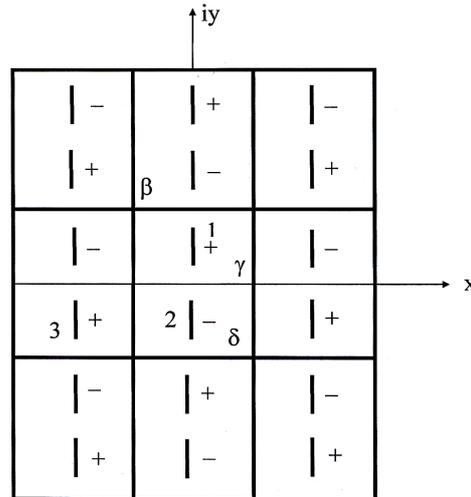


Рис. 4

$$E = C \frac{\sqrt{-\theta_2^2(V) e^{i\pi\tau/4} \theta_3^2(V)}}{\sqrt{\theta_1(z-i\ell)\theta_1(z-ia-i\ell)\theta_1(z+i\ell)\theta_1(z+ia+i\ell)}}$$

или

$$E = C \frac{\theta_2(V)\theta_3(V)}{\sqrt{\theta_1\left(\frac{z-i\ell}{2B}\right)\theta_1\left(\frac{z-ia-i\ell}{2B}\right)\theta_1\left(\frac{z+i\ell}{2B}\right)\theta_1\left(\frac{z+ia+i\ell}{2B}\right)}}. \quad (15)$$

Выражение (15) представляет собой конечную формулу для расчета поля в экранированном кабеле с прямоугольными жилами. Найдем константу C и проверим выполнение условия (1) и (12).

Возьмем произвольную точку на проводе ($x = 0, \ell < y < \ell + a$).

Аргумент $(z - ia - i\ell)$ в (15) - чисто мнимое число с отрицательной мнимой частью. Остальные аргументы θ_1 функций положительные, чисто мнимые. Поэтому выражение под корнем, являясь произведением отрицательного чисто мнимого и трех положительных чисто мнимых чисел, есть действительное отрицательное число. Корень из него чисто мнимый. Учитывая, что числитель в (15) действительный, как произведение двух действительных чисел, определяем, что C - чисто мнимая величина (поскольку электрическое поле E перпендикулярно проводнику).

2. Докажем, что найденное поле перпендикулярно экрану. Возьмем произвольную точку на экране (например, $x=B$) и подставим в (15):

$$\theta_2(V) = \theta_2\left(\frac{z}{2B}\right) = \theta_2\left(\frac{B+iy}{2B}\right) = \theta_2\left(\frac{1}{2} + V_1\right),$$

где $V_1 = iy/2B$ - чисто мнимый аргумент.

Согласно [4],

$$\theta_2\left(V_1 + \frac{1}{2}\right) = -\theta_1(V_1) \text{ - чисто мнимое число;}$$

$$\theta_3(V) = \theta_3\left(V_1 + \frac{1}{2}\right) = \theta_1(V_1) \text{ - действительное число;}$$

$$\theta_1\left(\frac{z-i\alpha}{2B}\right) = \theta_1\left(\frac{B+iy+i\alpha}{2B}\right) = \theta_1\left(\frac{1}{2} + V_1 - \frac{i\alpha}{2B}\right) = \theta_2\left(V_1 - \frac{i\alpha}{2B}\right) \text{ - положительное действительное число;}$$

$$\theta_1\left(\frac{z-i\alpha-i\ell}{2B}\right) = \theta_1\left(\frac{1}{2} + V_1 - \frac{i\alpha+i\ell}{2B}\right) = \theta_2\left(V_1 - \frac{i\alpha+i\ell}{2B}\right) \text{ - положительное действительное число.}$$

Таковыми же преобразованиями можно определить, что и остальные θ_1 функции - положительные действительные числа. Таким образом, в (15) числитель - чисто мнимый, знаменатель - действительный, коэффициент C - чисто мнимый.

Электрическое поле E – действительное число, т.е. направлено перпендикулярно экрану. Аналогичным способом можно доказать, что и на противоположном вертикальном участке экрана E направлено по нормали.

Докажем, что на горизонтальном участке $x=A$ поле перпендикулярно экрану.

Рассмотрим выражения (14) в произвольной точке $z = x + iA$. Обозначим $V_2 = x/2B$ и $\tau = iA/B$. В результате получим

$$\begin{aligned}\theta_2(V) &= \theta_2\left(\frac{x+iA}{2B}\right) = \theta_2\left(V_2 + \frac{\tau}{2}\right) = B(V_2)\theta_3(V_2), \\ B(V_2) &= e^{-in(V_2+\tau/4)}, \\ \theta_3(V) &= \theta_3\left(V_2 + \frac{\tau}{2}\right) = B(V_2)\theta_2(V_2), \\ \theta_1\left(\frac{x+iA-i\ell}{2B}\right) &= \theta_1\left(V_2 + \frac{\tau}{2} - \frac{i\ell}{2B}\right) = iB\left(V_2 - \frac{i\ell}{2B}\right)\theta_4\left(V_2 - \frac{i\ell}{2B}\right), \\ \theta_1\left(\frac{x+iA-i\alpha-i\ell}{2B}\right) &= \theta_1\left(V_2 + \frac{\tau}{2} - \frac{i\alpha+i\ell}{2B}\right) = iB\left(V_2 - \frac{i\alpha+i\ell}{2B}\right)\theta_4\left(V_2 - \frac{i\alpha+i\ell}{2B}\right), \\ \theta_1\left(\frac{x+iA+i\ell}{2B}\right) &= iB\left(V_2 + \frac{i\ell}{2B}\right)\theta_4\left(V_2 + \frac{i\ell}{2B}\right), \\ \theta_1\left(\frac{x+iA+i\ell+i\alpha}{2B}\right) &= iB\left(V_2 + \frac{i\ell+i\alpha}{2B}\right)\theta_4\left(V_2 + \frac{i\ell+i\alpha}{2B}\right).\end{aligned}$$

Подставив полученные значения в (15), получим

$$E = C \frac{\theta_3(V_2)\theta_2(V_2)}{\sqrt{\theta_4\left(V_2 - \frac{i\alpha+i\ell}{2B}\right)\theta_4\left(V_2 - \frac{i\ell}{2B}\right)\theta_4\left(V_2 + \frac{i\ell}{2B}\right)\theta_4\left(V_2 + \frac{i\ell+i\alpha}{2B}\right)}}. \quad (16)$$

Числитель в (16) – действительное число, поскольку аргумент V_2 действительный.

Рассмотрим знаменатель $\overline{V_2 - \frac{i\ell}{2B}} = V_2 + \frac{i\ell}{2B}$ и, следовательно,

$$\overline{\theta_4\left(V_2 - \frac{i\ell}{2B}\right)} = \theta_4\left(V_2 + \frac{i\ell}{2B}\right). \text{ Аналогично, } \overline{\theta_4\left(V_2 - \frac{i\alpha+i\ell}{2B}\right)} = \theta_4\left(V_2 + \frac{i\ell+i\alpha}{2B}\right).$$

Произведение сопряженных чисел положительно. Поэтому знаменатель в (16) действительный.

Учитывая, что C – чисто мнимый, получаем, что поле E – чисто мнимое, т.е. перпендикулярно горизонтальному участку экрана.

Заряд провода вычисляется по скачку поля E:

$$Q = \left| \int_{\ell}^{\ell+\alpha} f(z) dz \right|. \quad (17)$$

Разность потенциалов между проводами равна

$$\varphi = \left| \frac{1}{\varepsilon} \int_{-\ell}^{\ell} f(z) dz \right| = \frac{2}{\varepsilon} \left| \int_0^{\ell} f(z) dz \right|. \quad (18)$$

Тогда рабочую емкость цепи двухпарного экранированного кабеля с плоскими токопроводящими жилами можно определить по формуле

$$C = \frac{Q}{\varphi} \quad (19)$$

или

$$C = \frac{\varepsilon}{36\pi} \left[\frac{\left| \int_{\ell}^{\ell+\alpha} f(z) dz \right|}{\left| \int_0^{\ell} f(z) dz \right|} \right] \times 10^3 \left[\frac{n\Phi}{\text{км}} \right]. \quad (20)$$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Берс Л., Джон Ф., Шахтер М. Элементы функционального анализа. – М.: Наука, 1965.
2. Лаврентьев М.А., Шабат Б.В. Методы теории функции комплексного переменного – М.: Наука, 1972.- 736 с.
3. Тамм И.Е. Основы теории электричества. 3-е изд.- М.: ОГИЗ, 1946.
4. Бейтман Г., Эрдейн А. Высшие трансцендентные функции. – М.: Наука, 1966.- 295 с.
5. Тозони О.В. Метод вторичных источников в электротехнике. – М.: Энергия, 1975.- 295 с.
6. Корн Г., Корн Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров. – М.: Наука, 1978. – 331 с.
7. Иоссель Ю.Я. Расчет электрической емкости. – М.: Энергоиздат, 1997. – 240 с.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 12.07.2007.

Ժ.Մ. ՄԻՐԶԱԲԵԿՅԱՆ

ԺԱՊԱՎԵՆԱՅԻՆ ՀՈՍԱՆՔԱՀԱՂՈՐԴԻՉ ԲԱՐՉՐԱՀԱՃԱԽԱԿԱՆ ՄԱԼՈՒԽՆԵՐԻ
ԷԼԵԿՏՐԱՄԱԳՆԻՄԱԿԱՆ ՀԱՇՎԱՐԿ

Դիտարկում են հարթ հոսանքահաղորդիչ ջղերով մալուխի էլեկտրաունակության և ինդուկտիվության հաշվարկի մեթոդները: Տրվում է այդ հաշվարկների վերլուծությունը՝ θ ֆունկցիայի կիրառմամբ: 1,13 մմ² հատույթով հարթ ջղերի համար հաշվարկվում են ակտիվ դիմադրությունը և ունակությունը՝ 20 կՀց հաճախության դեպքում:

Առանցքային բառեր. հարթ մալուխ, թետա-ֆունկցիա, ինդուկտիվություն, էկրանի նկատմամբ սիմետրիկ դաշտ:

Zh.M. MIRZABEKYAN

ELECTRIC CABLE PARAMETERS WITH CONDUCTING THREAD

Calculation methods of electric capacity and cable induction with plane conducting threads are considered. The analysis of these calculations using theta functions is given. An active resistance and capacity at 20 kHz frequency are calculated for plane threads with cross-section 1,13 mm.

Keywords: plane cable, theta function, capacity, induction, symmetric field relative to the screen, two-field periodical function.

Г.Д. АКОПДЖАНЯН, В.С. САФАРЯН

НЕКОТОРЫЕ СВОЙСТВА ВХОДНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ ЦЕПНЫХ СХЕМ

Исследуются зависимости входных сопротивлений цепных схем от изменения числа их звеньев. Рассматривается изменение как их модулей, так и аргументов.

Ключевые слова: цепная схема, входное сопротивление, модуль, аргумент.

При проектировании и исследовании режимов работы длинных линий электропередач, линий связи, различных устройств автоматики и т.д. их часто представляют при помощи цепных схем [1, 2], состоящих из одинаковых, симметричных, пассивных, каскадно соединенных четырехполюсников (рис. 1).

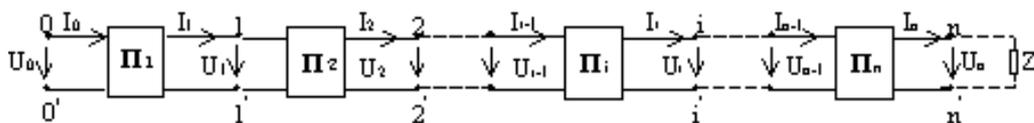


Рис.1

В качестве параметров, характеризующих симметричный, пассивный четырехполюсник, в статье рассматриваются его входные комплексные сопротивления Z_a и Z_{ab} при холостом ходе и, соответственно, коротком замыкании [1, 2].

В настоящей статье исследуются зависимости входных сопротивлений цепной схемы Z_{ia} и Z_{iab} от числа i четырехполюсников, входящих в ее состав, при синусоидальном режиме. Причем интерес представляют изменения как величин Z_{ia} , Z_{iab} , так и аргументов при различных значениях i .

Отметим, что сопротивления Z_{ia} , Z_{iab} выражаются соответствующими им параметрами одного четырехполюсника (Z_a , Z_{ab}) и зависят от числа четырехполюсников (i) в цепной схеме. Эти зависимости для симметричной цепной схемы имеют вид [3]

$$Z_{ia} = \frac{1 + \dot{C}^i}{1 - \dot{C}^i} Z_c = A(i) Z_c, \quad (1)$$

$$Z_{iab} = \frac{1 - \dot{C}^i}{1 + \dot{C}^i} Z_c = \frac{Z_c}{A(i)}. \quad (2)$$

Здесь $Z_c = Z_c e^{j\varphi} = \sqrt{Z_a Z_{ab}} = \sqrt{Z_{ia} Z_{iab}}$ является повторным сопротивлением цепной схемы [3], а комплексная величина равна

$$\dot{C} = Ce^{j\alpha} = \frac{Z_a - Z_c}{Z_a + Z_c}. \quad (3)$$

Имея в виду, что величины Z_c и \dot{C} не зависят от i , представим комплексные функции входных сопротивлений (1) и (2) зависящими только от вещественной переменной i .

В таком случае выяснение поведения функций (1) и (2) сводится к исследованию функции $A(i)$:

$$\begin{aligned} A(i) &= \frac{1 + \dot{C}^i}{1 - \dot{C}^i} = \frac{1 + C^i e^{j\alpha i}}{1 - C^i e^{j\alpha i}} = \frac{1 + C^i \cos i\alpha + jC^i \sin i\alpha}{1 - C^i \cos i\alpha - jC^i \sin i\alpha} = \\ &= \frac{1 - C^{2i}}{1 - 2C^i \cos i\alpha + C^{2i}} + j \frac{2C^i \sin i\alpha}{1 - 2C^i \cos i\alpha + C^{2i}}. \end{aligned} \quad (4)$$

Модуль и аргумент комплексной величины A будут

$$|A|^2 = \frac{1 + C^{2i} + 2C^i \cos i\alpha}{1 + C^{2i} - 2C^i \cos i\alpha}, \quad (5) \quad \arg(A) = \arctg \frac{2C^i \sin i\alpha}{1 - C^{2i}}. \quad (6)$$

Начнем с выяснения характера изменения модулей входных сопротивлений, хотя в [2] они изображены в виде графиков, без указания на аналитическое выражение функции и, на наш взгляд, с некоторым искажением.

Определим экстремумы функции (5). Взяв для этого производную по i и приравняв ее к нулю, получим

$$\ln C \cos i\alpha - \alpha \sin i\alpha - \alpha C^{2i} \sin i\alpha - C^{2i} \ln C \cos i\alpha = 0. \quad (7)$$

Решение полученного трансцендентного уравнения относительно переменной i проводится графическим методом. Для этого представим уравнение (7) в виде

$$\operatorname{tgi}\alpha = \frac{\ln C}{\alpha} \frac{1 - C^{2i}}{1 + C^{2i}}. \quad (8)$$

Построив графики функций $\operatorname{tgi}\alpha$ и функции в правой части равенства (8) от i , по точкам их пересечения определим решения трансцендентного уравнения. Имея в виду, что $C < 1$ и $\ln C < 0$, для случая $\alpha > 0$ графики указанных функций изображены на рис. 2, где и отмечены точки их пересечения, т.е. решения уравнения (7).

Рассмотрим случай, при котором $|A| = 1$, т.е. когда $Z_{ia} = Z_{iab} = Z_c$ (см. (1) и (2)), или, что то же самое, $\cos i\alpha = 0$ (см. (5)). Следовательно,

$$i = \frac{\pi k}{\alpha} + \frac{\pi}{2\alpha} = \frac{\pi}{\alpha} (k + 0,5). \quad (9)$$

Точки, удовлетворяющие этим условиям, изображены на оси i (рис. 2).

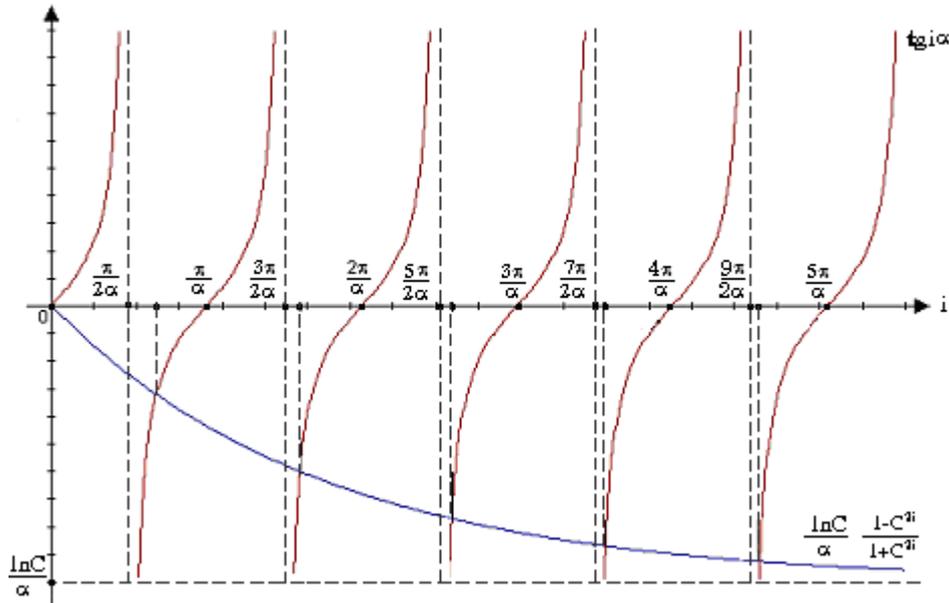


Рис.2

Что касается модулей входных сопротивлений, то, имея абсолютные значения $|A|$, они определяются из соотношений

$$Z_{ia} = |A|Z_c, \quad Z_{iab} = |A|^{-1}Z_c.$$

Кривые зависимости модулей этих сопротивлений приведены на рис. 3. Нетрудно заметить, что экстремумы Z_{ia} и Z_{iab} совпадают. Интересно отметить, что наибольшее Z_{iab} и наименьшее Z_{ia} значения достигаются при одном и том же значении параметра $i = i^*$ (рис. 3).

Перейдем к исследованию аргумента функции $A(i)$. Взяв производную от (6) и приравняв ее к нулю, получим

$$\ln C \sin i\alpha + C^{2i} \ln C \sin i\alpha - \alpha \cos i\alpha + \alpha C^{2i} \cos i\alpha = 0. \quad (10)$$

Для графического решения полученного трансцендентного уравнения относительно переменной i приведем его к виду

$$\operatorname{tg} i\alpha = \frac{\alpha}{\ln C} \frac{1 - C^{2i}}{1 + C^{2i}}. \quad (11)$$

Решив трансцендентное уравнение (10), получим экстремумы функции $\arg(A)$. Из (1) и (2) очевидно, что

$$\arg(Z_{ia}) = \varphi + \arg(A), \quad \arg(Z_{iab}) = \varphi - \arg(A). \quad (12)$$

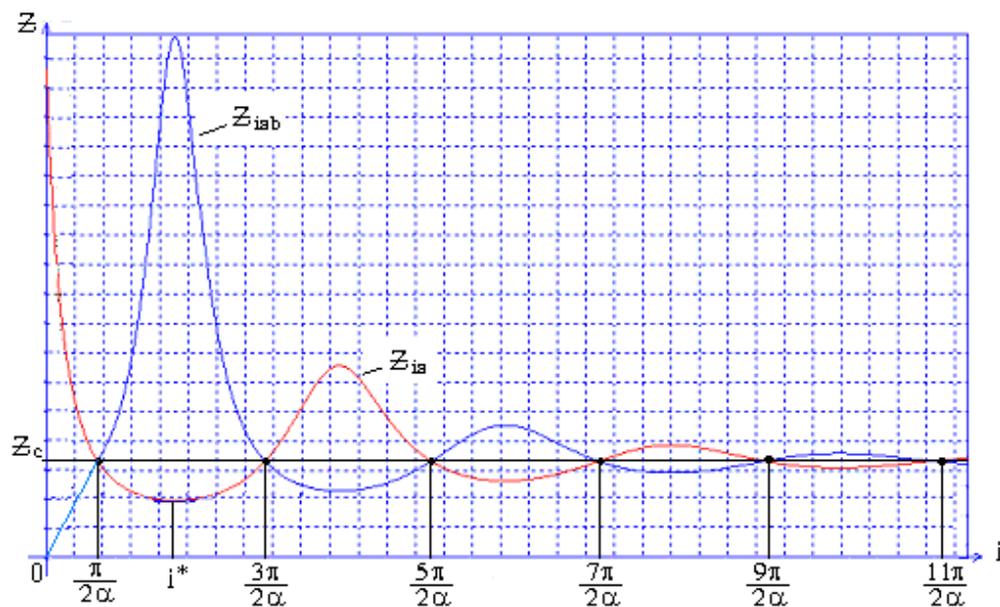


Рис. 3

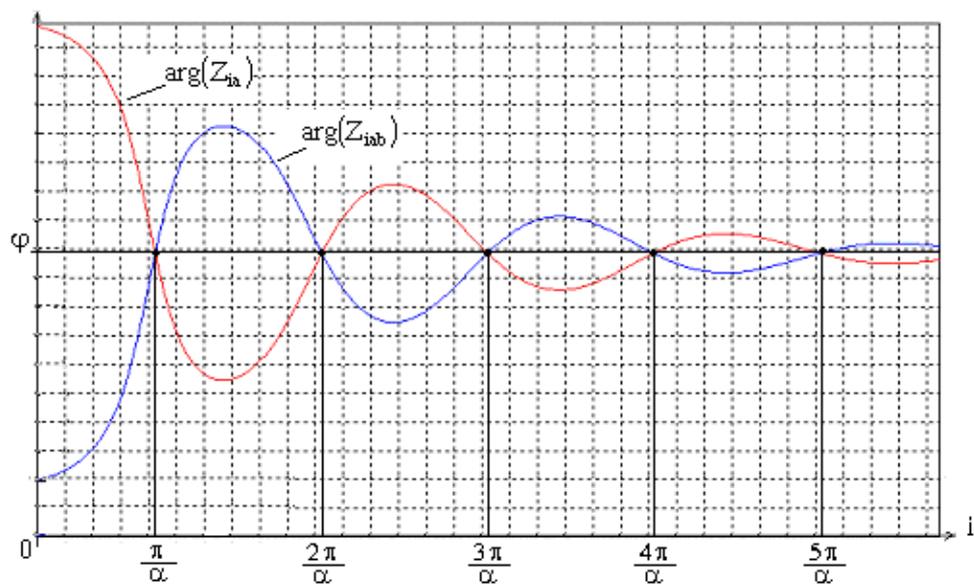


Рис. 4

Кривые зависимости аргументов входных сопротивлений от i (при $\alpha \geq 0$) приведены на рис. 4. Для их построения определено также значение $\arg(A)$ при $i = 0$:

$$\lim_{i \rightarrow 0} \frac{2C^i \sin i\alpha}{1 - C^{2i}} = -\frac{\alpha}{\ln C}$$

и, следовательно, при $i \rightarrow 0$:

Выводы

1. При синусоидальном режиме модули и аргументы входных сопротивлений цепной схемы в зависимости от числа i ее звеньев совершают соответственно колебания вокруг величины модуля и аргумента повторного сопротивления. Существует такое значение i^* , при котором сопротивления Z_{ia} и Z_{iab} достигают соответственно наименьшего и наибольшего значений (рис. 3).
2. При активно-индуктивном (емкостном) характере четырехполюсника спираль отображения (рис. 5) полностью расположена выше (ниже) полуоси $\operatorname{Re}(Z) \geq 0$. При индуктивно-емкостном характере четырехполюсника спираль пересекается с полуосью $\operatorname{Re}(Z) \geq 0$, точки пересечения соответствуют резонансному состоянию цепной схемы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Демирчян К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В., Чечурин В.Л. Теоретические основы электротехники. 4 - е изд. Том 2. - М. - СПб, 2004. - 573 с.
2. Атабеков Г.И. Теоретические основы электротехники. Ч. I. - М.: Госэнергоиздат, 1962. - 280 с.
3. Акопджанян Г.Д., Сафарян В.С. К исследованию однородных цепных схем// Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. - 2003. - Т.56, № 2. - С. 301 - 305.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 18.01.2007.

Գ.Դ. ՀԱԿՈԲՋԱՆՅԱՆ, Վ.Ս. ՍԱՖԱՐՅԱՆ

ՇՂԹԱՅԱԿԱՆ ՄԽԵՄԱՆԵՐԻ ՄՈՒՏՔԱՅԻՆ ԴԻՄԱՂՐՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՈՐՈՇ ՀԱՏՎՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐ

Ուսումնասիրվում է շղթայական սխեմաների մուտքային դիմադրությունների կախումը շղթան կազմող տարրերի թվից, դիտարկվում են ինչպես վերջիններիս մոդուլների, այնպես էլ արգումենտների փոփոխությունները:

Առանցքային բառեր. շղթայական սխեմա, մուտքային դիմադրություն, մոդուլ, արգումենտ:

G.D. HAKOBYANYAN, V.S. SAFARYAN

SOME FEATURES OF CHAIN SCHEME INPUT RESISTANCES

The dependence of chain scheme input resistances on the number of elements comprising the chain taking into consideration their modules as well as the changes in arguments is investigated.

Keywords: chain scheme, input resistances, module, argument.

Ю.А. АБРАМЯН, С.Г. МАРТИРОСЯН, С.С. ГЁЗАЛЯН

РАЗРАБОТКА ПРИЕМНИКА ТЕПЛООВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ $A^{IV}B^{VI}$ И ИСТОЧНИКА ТЕПЛА ДЛЯ ГРАДУИРОВКИ

Разработаны методика изготовления матрицы приемника теплового излучения (теплоприемников) на основе твердых растворов $A^{IV}B^{VI}$, а также точечный, малогабаритный аналог черного тела (АЧТ) с электронной схемой стабилизации температуры и с малым потреблением электроэнергии. Приводится методика проведения измерений для определения чувствительности теплоприемников. Выявлена возможность дистанционного измерения температуры с точностью порядка 0,02(С).

Ключевые слова: теплоприемник, излучение, температура, аналог черного тела.

Известно, что любые тела, температура которых не равна абсолютному нулю, излучают электромагнитные колебания всех длин волн, поэтому измерением интенсивности излучения можно дистанционно определить температуру тела. Термоэлектрические приборы сегодня находят широкое применение в оптоэлектронных системах для измерения энергии и мощности излучения окружающих объектов [1-3].

В последние годы ведутся исследования по совершенствованию принципов выращивания твердых растворов $A^{IV}B^{VI}$, легированию их определенными примесями и снижению их стоимости изготовления для применения в качестве тепловых датчиков в термоэлектрических приборах. Нами разработан модифицированный метод выращивания соединений $A^{IV}B^{VI}$ ($Pb_{1-x}Sn_x<In,Cd,Ge>$) с минимальной затратой электроэнергии и более простым наклонным методом Бриджмена. На основе данной методики, в зависимости от содержания In и Cd, материалы имели проводимость "n" и "p" типа.

Для повышения чувствительности теплоприемников была сконструирована матрица из большого количества (8...20) элементов "n" и "p" типов. Схема соединения приведена на рис.1а.

Для уменьшения занимаемой площади теплоприемников в пространстве они сгруппированы в виде звездочки, в центре которой находятся приемные теплочувствительные площадки, а по краям - холодные термостатированные площадки (рис.1б). Термопары попарно включены последовательно. Холодные концы опираются на края массивной металлической основы в форме медной чашки (рис.2).

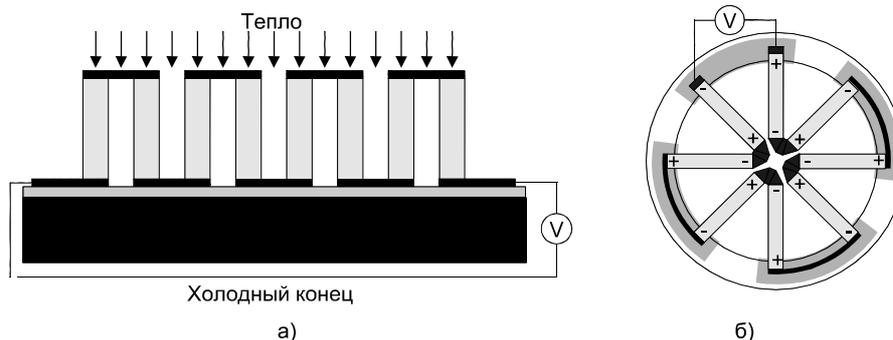


Рис.1

Центральные теплочувствительные концы покрыты тонким слоем черной теплопроводящей и электроизоляционной пасты. Поэтому центральная часть имеет коэффициент излучения $\epsilon_t \approx 1$.

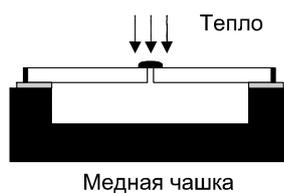


Рис.2

Для измерения чувствительности тепловых приемников используют специальный источник теплового излучения – черное тело. Так как в природе нет идеального черного тела, то обычно используют его аналоги. В [4] приведены несколько разновидностей эталонных источников излучения (штифт Нернста, полый шар, полый цилиндр, полый конус и т.д.). Температура АЧТ устанавливается в интервале 300...800 K и стабилизируется с погрешностью не хуже 0,1...0,5 K. Эти конструкции имеют довольно большие размеры, материалоемки и требуют значительных энергозатрат для поддержания заданной температуры (100...1500 Вт) (табл. 3.10, [4]).

В данной работе предлагается конструкция АЧТ, где в качестве излучателя используется провод из окисленного нихрома диаметром 1 мм, согнутый в виде вытянутой буквы "U". Согнутый конец придавливается таким образом, что образуется пленка размером 2x2x0,1 мм. Этот участок имеет высокое объемное сопротивление и при прохождении электрического тока нагревается больше, чем остальная часть проволоки, тем самым он становится точечным источником тепла. Остальная часть проволоки залуживается с целью уменьшения сопротивления и, соответственно, температуры. На рис.3 показан вид нагревателя (источника тепла) сбоку.

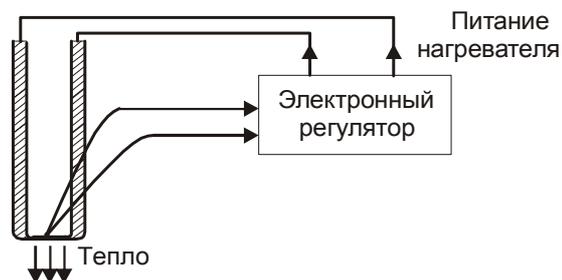
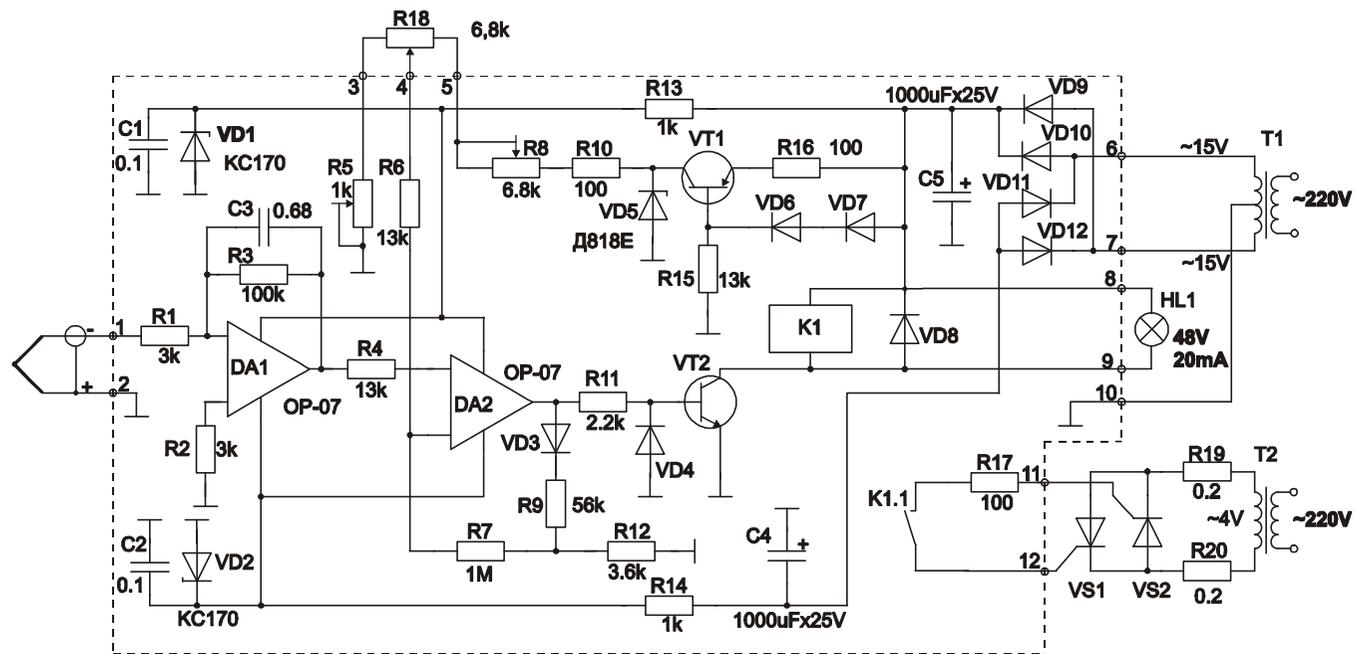


Рис.3

В качестве датчика температуры используется термопара медь-константан. Термочувствительный конец термопары прижимается к плоской части нагревательного элемента с внутренней стороны буквы “U” (рис.3). Для стабилизации температуры плоской части нагревателя (источника тепла) был разработан электронный регулятор температуры, принципиальная схема которого приведена на рис.4. Электронная схема разработана на базе прецизионных операционных усилителей типа ОР-07. Для исключения электрических наводок на входе усилителя напряжения термопары от проходящего через нагревательный элемент тока питание нагревателя осуществляется через изолирующий трансформатор 220/4 В. Коммутация тока осуществляется с помощью тиристорных ключей. Гальваническая изоляция управления обеспечивается с помощью геркона. На принципиальной схеме R19 является нагревательным элементом. Сопротивление R20 ограничивает ток нагревательного элемента. Температура нагревательного элемента регулируется с помощью R18 в пределах 50...400°C. Напряжение термопары усиливается предварительным усилителем на микросхеме DA1.

На DA2 собран компаратор, который сравнивает напряжение термопары с опорным напряжением от R18. Для получения высокостабильного опорного напряжения используется прецизионный стабилитрон VD5, питаемый генератором постоянного тока на VT1 [5,6].



VD3-VD4, VD6-VD12 - КД522
 VS1-VS2 - КУ202А
 К1 - РЭС55

Рис.4

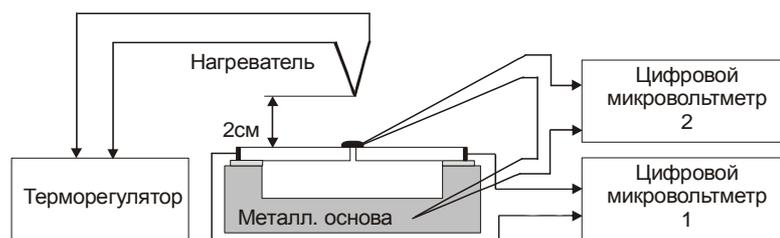


Рис.5

Измерения чувствительности теплоприемника проводятся по структурной схеме, приведенной на рис.5. Конец нагревательного элемента находится на высоте над центром теплоприемника на расстоянии 2 см. С помощью микровольтметра 1 измеряется выходное напряжение теплоприемника U_t , а с помощью микровольтметра 2 - выходное разностное напряжение двух термопар, одна из которых закреплена в центре (“горячий конец”), а другая - на краю (“холодный конец”) теплоприемника. С помощью переводной табл.1 [7] определяется разностная температура между “горячим” и “холодным” концами теплоприемника Δt .

Таблица 1

$\Delta t, ^\circ C$	50	100	150	200	250	300	350	400
ТермоЭДС, мВ	2,03	4,28	6,70	9,28	12,01	14,86	17,81	20,87

По результатам измерений рассчитывается чувствительность теплоприемника:

$$S = \frac{U_t \text{ мкВ}}{\Delta t \text{ град}}.$$

Усредненные значения чувствительности теплоприемника по 10-и измерениям для разных значений температуры излучателя приведены в табл.2.

Таблица 2

Температура излучателя, $^\circ C$	Выходное напряжение теплоприемника, мкВ	Разностное напряжение термопар, мкВ	Разностная температура между “горячим” и “холодным” концами, $^\circ C$	Чувствительность теплоприемника, мкВ/ $^\circ C$
100	115	4	0,08	1236
200	300	10	0,21	1428
300	540	18	0,38	1500
400	720	24	0,5	1200

Зависимость чувствительности матричного теплоприемника от температуры объекта измерения в общей форме совпадает с характеристикой зависимости, приведенной в [1] для одного элемента. Чувствительность матрицы изготовленного образца в четыре раза больше, чем у одного элемента.

На рис. 6 приведен график зависимости разностной температуры между “горячим” и “холодным” концами теплоприемника от температуры источника излучения.

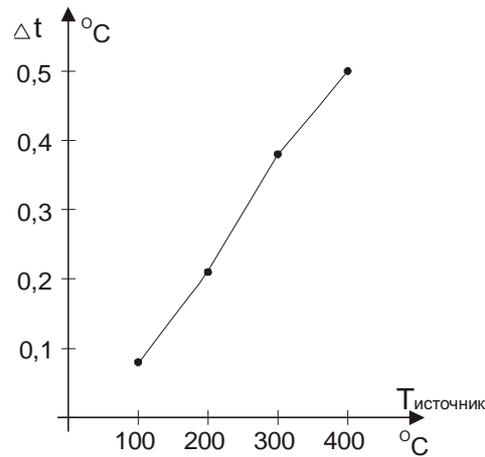


Рис. 6

Измерения проводились при температуре окружающей среды (холодных концов) 16 °C. С целью повышения точности и повторяемости измерений они проводились при отсутствии прямого солнечного освещения и ограничении воздушных потоков, резко влияющих на стабильность измерений. Погрешность измерения температуры (или тепловой уход во время измерений) зависит от стабильности поддержания температуры основания теплоприемника и в данном эксперименте составляет по напряжению $\Delta U = 1 \text{ мкВ}$.

Для определения погрешности по температуре рассчитывается величина разностной температуры термопары медь-константан, при которой на ее концах возникает напряжение $\Delta U = 1 \text{ мкВ}$.

По данным табл.1 определяется обратная величина чувствительности термопары медь-константан:

$$K = \frac{1}{S} = \frac{\Delta t}{U_{\text{Т.ЭДС}}} \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{мкВ}},$$

$$K_1 = \frac{50^{\circ}\text{C}}{2,03 \cdot 10^3 \text{ мкВ}} = 0,025 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{мкВ}} \text{ при } 50^{\circ}\text{C},$$

$$K_2 = \frac{400^{\circ}C}{20,87 \cdot 10^3 \text{ мкВ}} = 0,02 \frac{^{\circ}C}{\text{мкВ}} \text{ при } 400^{\circ}C .$$

В данном эксперименте погрешность измерения температуры составляла $0,02^{\circ}C$.

Из этого следует, что с помощью этого теплоприемника можно дистанционно измерять температуру с погрешностью порядка $0,02^{\circ}C$.

На основе проведенных измерений можно сделать следующие выводы:

1. Показана возможность упрощения конструкции аналога черного тела для практических измерений чувствительности теплоприемников (с точностью 1...5 %).
2. Разработанный АЧТ имеет малые габариты и энергопотребление (<15 Вт).
3. Разработанный теплоприемник на основе твердых растворов соединений $A^{IV}B^{VI}$ позволяет дистанционно измерять температуру с погрешностью порядка $0,02^{\circ}C$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Abrahamyan Yu. A., Martirosyan R. M., Gasparyan F. V., Kocharyan K.** Method and materials for Remote Sensing. Infrared Photo-Detectors, Radiometers and Arrays. - Kluwer Academic Publishers. Boston/Dordrecht/New York/London, 2004.-160 p.
2. **Абрамян Ю.А., Гаспарян Ф.В., Мартиросян Р.М.** Пороговые характеристики фотодетекторов. ИК-радиометры и основные материалы современной фотоэлектроники. - Ереван: Изд-во ЕГУ, 2000.-153с.
3. **Abrahamyan Yu. A., Aroutionian V. M.** Investigation of Thermoelectric Parameters of Solid Solution $Pb_{1-x}Sn_xTe<Cd>$ and Determination of their Application // Materials science and Engineering. -2004. - V.107. - P. 80-85.
4. **Криксунов Л.З.** Справочник по основам инфракрасной техники. - М.: Советское радио, 1978. – 400с.
5. **Гальперин М.В.** Практическая схемотехника в промышленной автоматике. - М.: Энергоатомиздат, 1987.– 320с.
6. **Хоровиц П., Хилл У.** Искусство схемотехники. – М.: Мир, 1986. - Т.1.– 598с.
7. **Рогельберг И.Л., Бейлин В.М.** Сплавы для термопар. – М.: Металлургия, 1983. – 360с.

Ин-т радиофизики и электроники НАН РА. Материал поступил в редакцию 15.05.2007.

Յու.Ա. ԱԲՐԱՀԱՄՅԱՆ, Ս.Գ. ՄԱՐՏԻՐՈՍՅԱՆ, Ս.Ս ԳՅՈԶԱԼՅԱՆ

A^{IV}B^{VI} ՊԻՆԴ ԼՈՒԾՈՒՅԹՆԵՐԻ ՀԻՄԱՆ ՎՐԱ ՋԵՐՄԱՅԻՆ ԸՆԴՈՒՆԻՉԻ ԵՎ ՆՐԱ ԱՍՏԻՃԱՆԱՎՈՐՄԱՆ ՀԱՄԱՐ ՋԵՐՄԱՅԻՆ ԱՂՔՑՈՒՐԻ ՄՇԱԿՈՒՄ

Մշակվել է A^{IV}B^{VI} պինդ լուծույթների հիման վրա ջերմաընդունիչների մատրիցի պատրաստման մեթոդիկա, ինչպես նաև կետային, փոքրածավալ օսն մարմնի անալոգ՝ ջերմաստիճանի էլեկտրոնային կարգավորմամբ և էլեկտրաէներգիայի փոքր սպառմամբ: Բերված է ջերմաընդունիչների զգայունության որոշման նպատակով չափումների անցկացման մեթոդիկա: Պարզվել է ջերմաստիճանի հեռակա չափման հնարավորությունը 0,02(C կարգի ճշտությամբ:

Առանքային բառեր. ջերմաընդունիչ, ճառագայթում, ջերմաստիճան, սև մարմին:

YU.A. ABRAHAMYAN, S.G. MARTIROSYAN, S.S. GYOZALYAN

DEVELOPMENT OF THERMAL RADIATION DETECTOR BASED ON A^{IV}B^{VI} SOLID SOLUTIONS AND THERMAL RADIATION SOURCE FOR CALIBRATION

A matrix-manufacturing method of thermal detectors based on A^{IV}B^{VI} solid solutions is developed. A spot, small-dimensional analog of blackbody radiation source (BRS) consumes low power and includes a temperature stabilization circuit. Sensitivity measurement method of such thermal detectors is described. Remote measurement of radiation temperature with accuracy 0.02°C is revealed.

Keywords: thermal receiver, radiation, temperature, blackbody.

А.Р. ДАВИДЯН, Г.В. БЕРБЕРЯН

ИССЛЕДОВАНИЕ КОМБИНИРОВАННОЙ ПОРТАТИВНОЙ СИСТЕМЫ ИК ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ НАЗЕМНЫХ ОБЪЕКТОВ

Рассмотрены вопросы информационной ценности лазерных радаров. Проведен анализ особенностей реализуемого с их помощью ИК сканирования наземных объектов. Представлены методы улучшения таких их характеристик, как быстродействие, 3D визуализация без сканирования с использованием 3D FPA(focal plane array) детекторов. Исследована система комбинированного портативного устройства, в целом представляющего собой подсистему, совмещающую ИК лазерный сканер и детектор для обнаружения и идентификации наземных целевых объектов. Дана оценка пропускной способности каналов и задержек в системе синхронизации между базовой станцией и подвижным объектом.

Ключевые слова: лазерный радар (сканер), ИК камеры, 3D FPA детекторы, GSM, GPRS, 3G, пропускная способность, система.

В [1-5] приведены результаты исследований ИК лазерного сканирования, в которых были представлены модели взаимодействия лазерного луча с целевыми объектами, анализ особенностей сканирования наземными ИК лазерными радаром, методы улучшения таких их характеристик, как быстродействие, 3D визуализация без сканирования с использованием 3D FPA(focal plane array) детекторов. Тщательный анализ ряда положительных следствий, вытекающих из указанных исследований, позволил авторам предложить модель системы сканирования лазерного радара (сканера), действующего совместно с ИК камерой для получения более детальной визуализации наблюдаемых объектов.

Данные, полученные с помощью лазерных радаров, представляют собой совокупность изображений точек, инициируемых лазерным облучением. На рис.1а представлены типовые примеры таких “лазерных” точек, которые соответствуют различным компонентам сканируемой поверхности. Высокой информативностью обладают лазерные точки, локализуемые на вертикальных поверхностях идентифицируемых объектов, например, транспортных средств. В силу строгой вертикальности расположения стен конструкции лазерные точки, отображающие стены конструкции, сразу определяют контуры их поверхностей. Существенно меньшей информативностью обладают точки, отраженные от поверхности земли. Для их правильной идентификации необходимо применение специальных математических методов, позволяющих

произвести их классификацию, т. е. определить с некоторой достоверностью, действительно ли эти точки принадлежат данному объекту. Значительную роль в определении информационной ценности данных играет программное обеспечение, которое позволяет выполнить распознавание и локализацию объектов и компонент ландшафта.

Рассмотрим распределение лазерных точек на идентифицируемой поверхности (сцены), которое непосредственно связано с качеством отображения облучаемой поверхности. Средняя плотность лазерных точек измеряется количеством *точек/м²*. Если плотность облучения меньше допустимой (рис.1 б), построенная модель поверхности, представленной профилем ее поперечного разреза (рельефом), будет отличаться от истинного профиля сцены. При выборе плотности облучения в любом из вышеуказанных режимов информативность изображения лазерного радара не увеличивается, и остается ограниченным ее оптимальный уровень, но, с другой стороны, снижается производительность съемки при уменьшении плотности облучения.

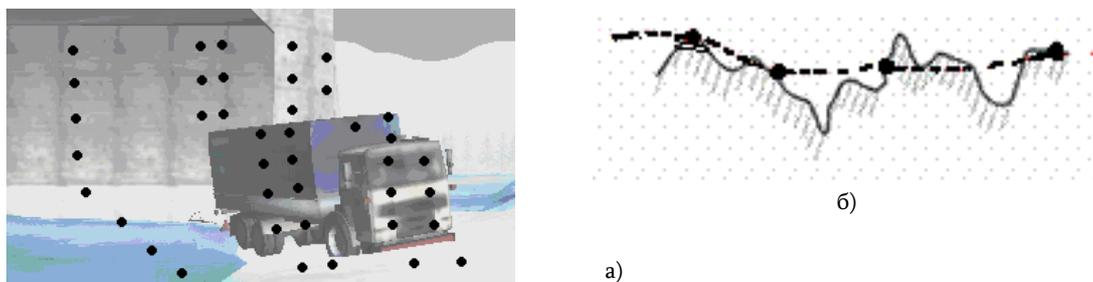


Рис.1. Распределение лазерных точек на поверхности распознаваемого объекта (а) и рельефе произвольного разреза (б)

Таким образом, при съемке идентифицируемой поверхности выбор оптимальной плотности облучения может быть произведен на основе теоремы Найквиста-Котельникова с учетом среднестатистического распределения лазерных точек на характерных поверхностях идентифицируемых объектов, в результате чего определяется частота дискретизации плотности облучения. Однако трудность указанного метода состоит в том, что рельеф на идентифицируемой поверхности априорно неизвестен и характеризуется случайным распределением.

Для увеличения степени точности отображения исследуемой поверхности объекта не менее важное значение имеют размеры FPA, определяющие количество светоизлучающих или поглощающих пикселей.

Камеры, описанные в [2], имеют FPA размером 128x128 пикселей, однако такой размер не является технологическим ограничением. Не является ограничением и частота кадров 30 Гц. Такой импульсный лазерный радар имеет способность охватить все 3D изображение только

одним переданным импульсом. В указанной системе возможно увеличение частоты следования кадров до 50...60 Гц для получения данных о движущихся объектах. Такой детектор может иметь те же размеры, что и обычная камера, которая в пиксельном выражении может достичь существенно больших размеров, например, 512x512, а также лазерный источник, подходящий для портативного применения. Для идентификации на коротких дистанциях лазер можно включить в саму камеру.

Для моностатического лазерного радара при поиске цели на расстоянии R принятая мощность P_r может быть записана в виде [3]

$$P_r = P_t \eta_t \eta_r G A_r T_{atm}^2 (R) / R^2, \quad (1)$$

где P_t - передаваемая мощность, Вт; η_t и η_r - КПД, %, соответственно передатчика и приемника; T_{atm} - атмосферные потери передачи по обоим направлениям, дБ; A_r - площадь приемного окна приемника, м²; G - нормированная интенсивность отражения от цели, *стер*⁻¹.

В основе расчета лежит определение числа фотонов на пиксель, которое находят по формуле [3]

$$N_{ph/pix} = E_p \cdot \frac{\rho}{\pi} \cdot \frac{\pi D^2}{4R^2} \cdot \frac{1}{N_{pix}} \cdot \frac{1}{h\nu} \cdot T_{atm}^2, \quad (2)$$

где E_p - энергия лазерного импульса, Дж; N_{pix} - число пикселей в матрице, безразмерная величина; D - диаметр приемника, м; ρ - отражательная способность облучаемой поверхности, %.

Предположим, что требуется произвести сканирование на расстоянии до $R=5 \cdot 10^3$ м, доступном для целей нашего исследования, при среднем коэффициенте отражения $\rho=10\%$, энергии лазерного луча $E_p=100$ мДж, диаметре приемника 0,1 м и количестве пикселей в матрице 128·128.

Как видно из формулы (2), количество фотонов на пиксель, помимо прочих параметров, зависит и от атмосферных потерь. Так, при длине волны 1,5 мкм и силуэтной видимости объектов на 15 км атмосферные потери в обоих направлениях (от передатчика до цели и обратно к приемнику) составят $T_{atm}^2=10$ дБ. При длине волны 1,5 мкм энергия фотона равна $E=hh\nu=1,3 \cdot 10^{-19}$ Дж. Подставляя эти значения в формулу (2), получим количество фотонов на пиксель, равное $N_{ph/pix}=152$.

Исходя из результатов предварительного анализа теоретических соотношений, характеризующих процессы ИК облучения поверхностей различных тел и определенной части указанного излучения, отраженной поверхностью облучаемого объекта, в настоящей работе произведена попытка разработки алгоритма функционирования портативной лазерной системы с предельно доступной детализацией данных для идентификации различных объектов.

Структура предлагаемой системы показана на рис.2.

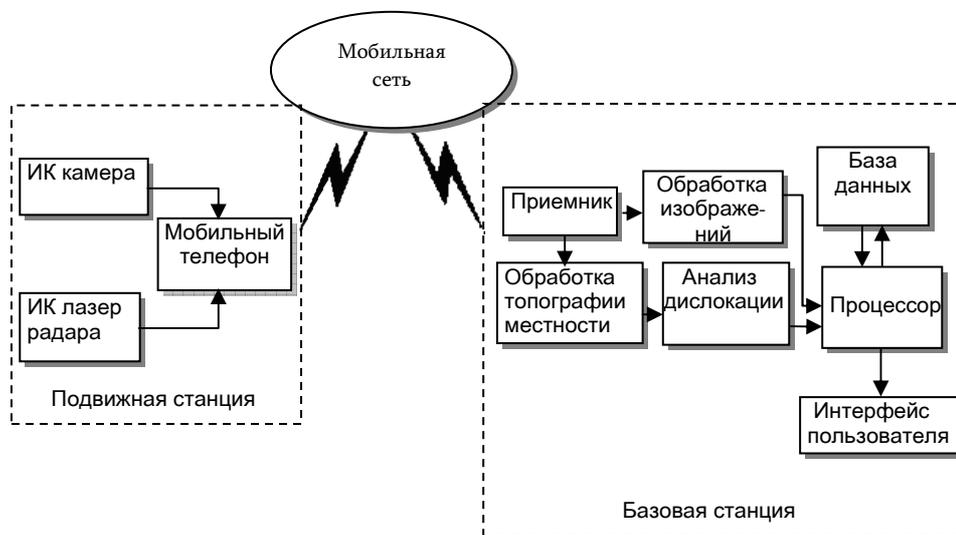


Рис.2. Структурная схема портативной лазерной системы идентификации объектов

Данную систему можно подразделить на две части: портативную подвижную станцию и неподвижную (базовую) станцию. Подвижная станция содержит в себе инфракрасную камеру [4] и лазерный радар, действующие в пределах до 1000 м, а также мобильный терминал. Данные в формате 2D, полученные с выхода ИК камеры, и данные в формате 3D, полученные с выхода лазерного радара, поступают на мобильный терминал, которые затем передаются через мобильную сеть на базовую станцию.

Одним из важнейших вопросов является объединение лазерного сканера и ИК камеры в одно целое устройство. Главное преимущество ИК камеры - это очень короткое время приема излучения. Лазерные сканеры - это устройства активного облучения с собственным источником излучения, и, следовательно, они подвержены влиянию внешнего освещения.

Таким образом, задача комбинирования сводится к совмещению пассивной и активной рабочих подсистем. При комбинировании, по мере возможности, должно быть гарантировано практическое совпадение с наиболее доступной точностью оптического центра камеры с оптическим центром сканера. Оба устройства должны быть так сопряжены друг с другом, чтобы обе горизонтальные оси вращения были ориентированы друг к другу параллельно.

Важнейшим вопросом теоретического и прикладного характера является также передача полученной от ИК системы лазерной идентификации видеоинформации по сетям сотовой связи. Как уже было сказано выше, в системе может оказаться востребованным увеличение частоты следования кадров до 50...60 Гц, что обусловлено необходимостью получения данных

о движущихся объектах. Передача же видеоданных при указанной частоте следования кадров по сетям сотовой связи с использованием стандарта GSM не представляется возможной даже с

применением новейших методов сжатия видеоданных, способствующих уменьшению их скоростей передачи до допустимых в этом стандарте значений, позволяющих обеспечить возможность получения приемлемого качества изображения идентифицируемого объекта.

Однако при использовании GPRS или EDGE, в которых максимальная теоретическая скорость передачи данных приближается к 200 *кбит/с* (172 *кбит/с* для GPRS), а практически реализуется до 30...40 *кбит/с* (рис 3), возможна передача видеопоследовательности с применением формата 3gp или алгоритмов сжатия с применением вейвлет - преобразований [4-5], но при довольно низком качестве изображения идентифицируемого объекта.

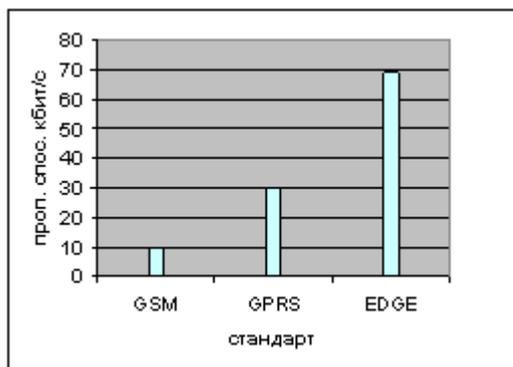


Рис.3. Пропускная способность на один канальный интервал

Сети GPRS используют радиоканалы шириной 200 *кГц*, в которых каждый канал разделяется на восемь временных окон, как показано на рис 4.



Рис 4. Временные окна радиоканала GPRS

В этих окнах каждый интервал способен обеспечить пропускную способность 13 *кбит/с*. Таким образом, пропускная способность для пользователя будет зависеть от числа временных окон, которое может обработать его устройство, и от предоставляемого оператором обслуживания. Вообще в распоряжении пользователя могут находиться все 8 временных окон, при которых пропускная способность может достигать до 8(13=104 *кбит/с*, однако операторы могут ограничить число используемых временных окон до четырех с пропускной способностью 4(13=52 *кбит/с*. Таким образом, в зависимости от требуемого качества передачи видеоданных, число используемых временных окон может меняться.

В реально действующих сетях третьего поколения UMTS скорость передачи данных может достигать до 1 *Мбит/с*, а при использовании высокоскоростных технологий – до 14 *Мбит/с*. Для таких скоростей передача видеопоследовательности с вышеуказанной требуемой скоростью передачи при реализации доступных степеней сжатия, очевидно, перестанет быть проблемой, и можно использовать стандарт MPEG 4 с I,P,B кадрами. Здесь не менее важна задержка (*c*) при установлении синхронизации подвижного терминала с базовой станцией, которая может определяться как

$$\tau = \frac{1}{I_{\text{частота}}} - \frac{1}{f_{\text{кадр}}},$$

где $I_{\text{част.}}$ - частота следования I кадров и $f_{\text{кадр}}$ - частота следования кадров в видеокомпрессии, Таким образом, $I_{\text{частота}}=f_{\text{кадр}}/n$, где n представляет собой число P и B кадров между I кадрами, т. е. через сколько кадров следует следующий I кадр или число кадров в группе. Например, можно принять значение $n=12$ при последовательности IBVBPVBPVBPVBI. На рис. 5 показаны кривые зависимости задержки установки синхронизации между базовой станцией и подвижным терминалом от числа кадров в группе при $f_{\text{кадр}}=30$ *кадр/с* (сплошная линия) и $f_{\text{кадр}}=40$ *кадр/с* (пунктир).

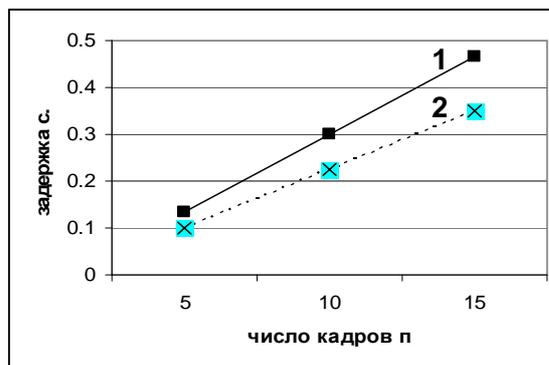


Рис. 5. Зависимость задержки установки синхронизации от числа кадров в группе при разных частотах кадров в видеокомпрессии

Что касается передачи и приема данных, то в предлагаемой структурной схеме базовая станция принимает информацию с подвижных станций, производя обработку видеоданных,

топографию местности, анализ месторасположения и идентификацию объектов, после чего данные поступают на интерфейс пользователя. В базовой станции содержится процессор, который обрабатывает и суммирует данные (производит выявление характерных черт и вычисление конфигурации объекта), полученные от лазерного сканера и ИК камеры независимо друг от друга. Для обработки данных, полученных от ИК камеры и лазерного сканера, с целью распознавания объектов, процессор запрашивает информацию из базы данных, в которой хранятся сведения о типичных сухопутных транспортных средствах и объектах. Затем с помощью специальных алгоритмов распознавания вычисляет целевые объекты.

В системе может быть использовано большое число подвижных станций, данные с которых также будут поступать на базовую станцию. Месторасположение подвижных станций фиксируется при помощи системы спутниковой навигации GPS, внедренной в мобильный телефон.

Для дальнейшего развития предложенной системы, на наш взгляд, можно указать такие направления, как внедрение в разработанную систему новых типов 3D FPA детекторов для одновременной активной и пассивной визуализации; реализация обработки сигнала непосредственно на FPA, в частности, проектирование аналого-цифрового преобразователя на чипе FPA, что позволит получить цифровой сигнал прямо на выходе FPA; выполнение нескольких функций измерения дальности до визуализации с использованием одного и того же лазера; применение новых 3D средств для обеспечения наибольшей различимости деталей образов при распознавании и т.д.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Shapiro Jeffrey H.** Target-reflectivity theory for coherent laser radars // APPLIED OPTICS.-1982.-Vol.21, No.18.- P. 3398-3407.
2. **Stettner Roger, Bailey Howard, Silverman Steven.** Three Dimensional Flash Radar Focal Planes and Time Dependent Imaging // Advanced Scientific Concepts, Inc. - 2005.
3. **Steinval Ove, Carlsson Tomas, Grunwall Christina, Larsson Hekan, Klasin Lena** Laser Based 3-D Imaging New Capabilities for Optical Sensing // Technical report FOI-R-0856-SE.- April 2003. – P. 1650-1942.
4. **Давидян А.Р., Берберян Г.В.** Исследование ИК сканирования для передачи видеоинформации через портативный мобильный терминал // Вестник ГИУА. Сер. Моделирование, оптимизация, управление. – 2007. - Вып. 10, том 2. – С. 47-56.
6. **Берберян Г.В., Давидян А.Р., Жамакочян Д.Г.** Применение вейвлет-преобразований для эффективного сжатия изображений // Вестник ГИУА. Сер. Моделирование, оптимизация, управление. – 2007. – Вып. 10, том 1. – С. 51-59.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 17.03.2008.

Ա.Ռ. ԴԱՎԻԹՅԱՆ, Գ.Վ. ԲԵՐԲԵՐՅԱՆ

**ՑԱՄԱՔԱՅԻՆ ՕԲՅԵԿՏՆԵՐԻ ԻՎ ԼԱԶԵՐԱՑԻՆ ՏԵՍԱԾՐՄԱՆ ՀԱՄԱԿՑՎԱԾ
ԴՅՈՒՐԱԿԻՐ ՀԱՄԱԿԱՐԳԻ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԸ**

Դիտարկված են լազերային ռադարների ինֆորմացիոն արժեքների վերաբերյալ հարցեր: Իրականացված է դրանց միջոցով իրագործվող ցամաքային օբյեկտների ԻՎ տեսածրման առանձնահատկությունների վերլուծությունը: Բերված են վերջիններիս բնութագրերի բարելավման մեթոդներ, ինչպիսիք են արագագործությունը, 3D տեսանկյունում առանց տեսածրում իրականացնելու, օգտագործելով 3D FPA դետեկտորներ: Հետազոտված է համակցված դյուրակիր սարքի համակարգը, որը համատեղում է ԻՎ լազերային սկաներ և ԻՎ դետեկտոր՝ ցամաքային օբյեկտների հայտնաբերման և նույնացման համար: Տրված են ուղու թողարկման հատկության և բազային ու շարժական կայանների միջև սինքրոնացման հապաղումների գնահատականները :

Առանցքային բառեր. լազերային ռադար (սկաներ), ԻՎ խցիկ, 3D FPA դետեկտոր, GSM, GPRS, 3G թողարկման հատկություն, համակարգ.

A.R. DAVITYAN, G.V. BERBERYAN

**INVESTIGATION OF A COMBINED PORTABLE IR SYSTEM FOR LASER
SCANNING LAND-BASED OBJECT**

Some problems of informative capacities of laser radar are considered. An analysis of specific properties realizing IR identification systems has been developed for land-based objects laser scanning. Some technical characteristics of the systems are mentioned, such as systems response speed, 3D imaging non-scanning by using 3D FPA detectors. The combined portable facilities as a whole present a joint structure Laser IR Scanner and IR irradiation detector for identifying land-based object. The estimation of channel capacity and delays in the synchronization system between base station and mobile station are given.

Keywords: laser radar (scanner), IR camera, 3D FPA detector, GSM, GPRS, 3G, channel capacity, system.

А.А. ТЕРЗЯН, Г.С. СУКИАСЯН, А.Э. АКОПЯН

**К РАСЧЕТУ ТРЕХМЕРНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ МЕТОДОМ
КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

Получены и исследованы геометрические характеристики системы уравнений, возникающей при численном решении трехмерных нелинейных полевых задач методом конечных элементов. Доказано отрицательное влияние наличия в тетраэдрической сетке тупых углов на сходимость итерационного процесса. Дана оценка критического угла, при превышении которого задача расходится.

Ключевые слова. электромагнитное поле, метод конечных элементов, трехмерные тетраэдрические сетки.

Введение. Сходимость процесса последовательных приближений при решении нелинейных полевых задач методом конечных элементов сильно зависит от конфигурации дискретизационной сетки. Задача построения оптимальной сетки становится особенно актуальной в последние годы, когда автоматическому построению сетки с динамической декомпозицией элементов дискретизации (см. [1]) отдается предпочтение перед ручным. Однако при построении сетки “вручную” опытный специалист интуитивно строит “красивую” сетку, тогда как недостаточно продуманный алгоритм автоматического построения сетки может привести к нежелательным элементам, которые могут стать причиной расходимости процесса.

Поэтому остро необходимо иметь математически обоснованные ограничения на геометрию сеток. Так, например, из практического опыта численного решения двумерных краевых задач замечено, что наличие в сетке тупоугольных треугольников отрицательно сказывается на сходимости процесса решения. В [2] дано строгое математическое обоснование этого явления и оценено критическое значение угла, при превышении которого задача расходится. В настоящей работе результаты, полученные в [2] для двумерных полевых задач, обобщены на трехмерный случай. Доказано отрицательное влияние на сходимость итерационного процесса наличия в тетраэдрической сетке тупых углов (как плоских, так и линейных). Здесь и далее под тетраэдром будем понимать произвольный четырехгранник (необязательно правильный).

Вывод уравнений для численного расчета трехмерных стационарных нелинейных магнитных полей методом конечных элементов с использованием вариационного исчисления был дан в [3]. В [4, 5] расчетные уравнения для двумерных магнитных полей методом конечных элементов получены и реализованы на основе вариационного подхода с использованием базисных функций. Этот подход имеет преимущество в том, что базисные функции легко обобщаются на многомерный случай.

В настоящей работе для выделения и исследования геометрических характеристик расчетные уравнения трехмерного поля получены и преобразованы с использованием понятия базисных функций.

Отметим важную особенность трехмерных полевых задач: в отличие от двумерных составляющие векторного магнитного потенциала зависят от выбора направления координатных осей. Следовательно, и расчетные уравнения для нахождения этих составляющих неявно зависят от направления координатных осей. В настоящей работе коэффициенты расчетной системы линейных уравнений разложены на сомножители, явно зависящие от направления координатных осей, и на сомножители, инвариантные относительно вращений. Показано, что сходимость итерационного процесса решения полевых задач зависит только от сомножителей второго типа, следовательно, не зависит от выбора направления координатных осей (хотя само решение зависит).

1. Численный расчет трехмерного поля методом конечных элементов. Постоянное магнитное поле, созданное электрическим током, подчиняется классическому уравнению Максвелла:

$$\operatorname{rot} \frac{1}{\mu} (\operatorname{rot} \bar{A}) = \delta.$$

В декартовой системе координат (x, y, z) уравнение Максвелла приобретает вид

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

где $A = (A^x, A^y, A^z)$ - векторный магнитный потенциал; $\delta = (\delta^x, \delta^y, \delta^z)$ - вектор плотности тока; μ - величина магнитной проницаемости.

Прямое решение системы (1) затруднительно из-за нелинейности задачи: величина магнитной проницаемости зависит от потенциала и тоже является неизвестной. В методе конечных элементов задача решения системы (1) заменяется вариационной, т.е. рассматривается некий функционал, минимум которого достигается точным решением уравнений (1). Затем с помощью метода базисных функций можно получить расчетные уравнения для минимизации функционала.

Докажем, что минимум следующего функционала достигается решением уравнения Максвелла (1):

$$F = \iiint_{\Omega} (f_x + f_y + f_z) dx dy dz,$$

где Ω - рассматриваемая область и

$$\begin{cases} f_x = \frac{1}{2\mu} \left[\left(\frac{\partial A^x}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial A^x}{\partial z} \right)^2 - \frac{\partial A^y}{\partial x} \frac{\partial A^x}{\partial y} - \frac{\partial A^z}{\partial x} \frac{\partial A^x}{\partial z} \right] - \delta^x A^x, \\ f_y = \frac{1}{2\mu} \left[\left(\frac{\partial A^y}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial A^y}{\partial z} \right)^2 - \frac{\partial A^y}{\partial x} \frac{\partial A^x}{\partial y} - \frac{\partial A^z}{\partial y} \frac{\partial A^y}{\partial z} \right] - \delta^y A^y, \\ f_z = \frac{1}{2\mu} \left[\left(\frac{\partial A^z}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial A^z}{\partial x} \right)^2 - \frac{\partial A^y}{\partial z} \frac{\partial A^z}{\partial y} - \frac{\partial A^z}{\partial x} \frac{\partial A^x}{\partial z} \right] - \delta^z A^z. \end{cases} \quad (2)$$

Применим для составляющей по оси x известное из вариационного исчисления уравнение Эйлера-Лагранжа:

$$\frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial(f_x + f_y + f_z)}{\partial \left(\frac{\partial A^x}{\partial x} \right)} + \frac{\partial}{\partial y} \frac{\partial(f_x + f_y + f_z)}{\partial \left(\frac{\partial A^x}{\partial y} \right)} + \frac{\partial}{\partial z} \frac{\partial(f_x + f_y + f_z)}{\partial \left(\frac{\partial A^x}{\partial z} \right)} - \frac{\partial(f_x + f_y + f_z)}{\partial A^x} = 0.$$

Из (2) имеем

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_x}{\partial \frac{\partial A^x}{\partial x}} &= 0, \quad \frac{\partial f_x}{\partial A^x} = -\delta^x, \\ \frac{\partial(f_x + f_y)}{\partial \frac{\partial A^x}{\partial y}} &= \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial A^x}{\partial y} - \frac{\partial A^y}{\partial x} \right), \\ \frac{\partial(f_x + f_z)}{\partial \frac{\partial A^x}{\partial z}} &= \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial A^x}{\partial z} - \frac{\partial A^z}{\partial x} \right). \end{aligned}$$

Остальные производные равны нулю. Подставляя их в уравнение Эйлера-Лагранжа, получим первое из уравнений (1). Остальные уравнения получаются аналогично перестановкой индексов x, y, z .

Дискретизируем задачу, разбив рассматриваемую область Ω на тетраэдры (элементы) и приняв, что внутри элемента e магнитная проницаемость μ постоянна, а потенциалы являются линейной функцией вида

$$A^x = \sum_{t \in W_e} A_t^x b_t^e(x, y, z), \quad A^y = \sum_{t \in W_e} A_t^y b_t^e(x, y, z), \quad A^z = \sum_{t \in W_e} A_t^z b_t^e(x, y, z), \quad (3)$$

где $W_e = (i, j, k, m)$ - множество вершин элемента e ; A_t - значение потенциала A в узле t ; $b_t^e(x, y, z)$ - базисная функция, т.е. линейная функция, равная единице в узле t и нулю в остальных трех вершинах тетраэдра e .

Базисные функции удобно записать в виде детерминанта

$$b_k^e(x, y, z) = \frac{1}{3V_e} \begin{vmatrix} x & y & z & 1 \\ x_j & y_j & z_j & 1 \\ x_i & y_i & z_i & 1 \\ x_m & y_m & z_m & 1 \end{vmatrix}, \quad (4)$$

где (x_t, y_t, z_t) - декартовы координаты вершин тетраэдра, $t = (i, j, k, m)$; V_e - объем тетраэдра e :

$$3V_e = \begin{vmatrix} x_i & y_i & z_i & 1 \\ x_j & y_j & z_j & 1 \\ x_k & y_k & z_k & 1 \\ x_m & y_m & z_m & 1 \end{vmatrix}.$$

Подставляя (3) в (2), получим

$$\left\{ \begin{aligned} f_x &= \frac{1}{2\mu} \left[\left(\sum_{t \in W_e} A_t^x \frac{\partial b_t^e}{\partial y} \right)^2 + \left(\sum_{t \in W_e} A_t^x \frac{\partial b_t^e}{\partial z} \right)^2 \right] - \frac{1}{2\mu} \left[\left(\sum_{t \in W_e} A_t^x \frac{\partial b_t^e}{\partial y} \right) \times \right. \\ &\times \left. \left(\sum_{t \in W_e} A_t^y \frac{\partial b_t^e}{\partial x} \right) + \left(\sum_{t \in W_e} A_t^x \frac{\partial b_t^e}{\partial z} \right) \left(\sum_{t \in W_e} A_t^z \frac{\partial b_t^e}{\partial x} \right) \right] - \delta^x \sum_{t \in W_e} A_t^x b_t^e, \\ f_y &= \frac{1}{2\mu} \left[\left(\sum_{t \in W_e} A_t^y \frac{\partial b_t^e}{\partial x} \right)^2 + \left(\sum_{t \in W_e} A_t^y \frac{\partial b_t^e}{\partial z} \right)^2 \right] - \frac{1}{2\mu} \left[\left(\sum_{t \in W_e} A_t^x \frac{\partial b_t^e}{\partial y} \right) \times \right. \\ &\times \left. \left(\sum_{t \in W_e} A_t^y \frac{\partial b_t^e}{\partial x} \right) + \left(\sum_{t \in W_e} A_t^z \frac{\partial b_t^e}{\partial y} \right) \left(\sum_{t \in W_e} A_t^y \frac{\partial b_t^e}{\partial z} \right) \right] - \delta^y \sum_{t \in W_e} A_t^y b_t^e, \\ f_z &= \frac{1}{2\mu} \left[\left(\sum_{t \in W_e} A_t^z \frac{\partial b_t^e}{\partial x} \right)^2 + \left(\sum_{t \in W_e} A_t^z \frac{\partial b_t^e}{\partial y} \right)^2 \right] - \frac{1}{2\mu} \left[\left(\sum_{t \in W_e} A_t^x \frac{\partial b_t^e}{\partial z} \right) \times \right. \\ &\times \left. \left(\sum_{t \in W_e} A_t^z \frac{\partial b_t^e}{\partial x} \right) + \left(\sum_{t \in W_e} A_t^y \frac{\partial b_t^e}{\partial z} \right) \left(\sum_{t \in W_e} A_t^z \frac{\partial b_t^e}{\partial y} \right) \right] - \delta^z \sum_{t \in W_e} A_t^z b_t^e. \end{aligned} \right. \quad (5)$$

Система (5) является дискретным аналогом системы (2). Функционалы (2) зависят от неизвестных функций A^x, A^y, A^z , тогда как в (5) неизвестными являются числа A_t - значения потенциала A в узле t . Искомую систему уравнений получим, приравняв нулю соответствующие производные. Для фиксированного узла k имеем

$$\frac{\partial F}{\partial A_k^x} = \sum_{e \in E_k} \iiint_e \frac{\partial}{\partial A_k^x} (f_x + f_y + f_z) dx dy dz = 0,$$

где E_k - множество элементов e , содержащих узел k .

Из (5) получается

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_x}{\partial A_k^x} = \frac{1}{2\mu} & \left[2 \left(\sum_{t \in W_e} A_t^x \frac{\partial b_t^e}{\partial y} \right) \frac{\partial b_k^e}{\partial y} + 2 \left(\sum_{t \in W_e} A_t^x \frac{\partial b_t^e}{\partial z} \right) \frac{\partial b_k^e}{\partial z} - \right. \\ & \left. - \left(\sum_{t \in W_e} A_t^y \frac{\partial b_t^e}{\partial x} \right) \frac{\partial b_k^e}{\partial y} - \left(\sum_{t \in W_e} A_t^z \frac{\partial b_t^e}{\partial x} \right) \frac{\partial b_k^e}{\partial z} \right]. \end{aligned}$$

Аналогично вычисляя остальные производные, получаем систему линейных уравнений

$$\begin{cases} \frac{\partial F}{\partial A_k^x} = \sum_{e \in E_k} \left[v_e \sum_{t \in W_e} (a_{kt}^{xx} A_t^x - a_{kt}^{xy} A_t^y - a_{kt}^{xz} A_t^z) - \delta^x a_k^e \right] = 0, \\ \frac{\partial F}{\partial A_k^y} = \sum_{e \in E_k} \left[v_e \sum_{t \in W_e} (a_{kt}^{yy} A_t^y - a_{kt}^{yx} A_t^x - a_{kt}^{yz} A_t^z) - \delta^y a_k^e \right] = 0, \\ \frac{\partial F}{\partial A_k^z} = \sum_{e \in E_k} \left[v_e \sum_{t \in W_e} (a_{kt}^{zz} A_t^z - a_{kt}^{zx} A_t^x - a_{kt}^{zy} A_t^y) - \delta^z a_k^e \right] = 0, \end{cases} \quad (6)$$

где v_e - значение $v = 1/\mu$ внутри элемента e ; a_{kt}^e - коэффициент взаимодействия вершины k с вершинами t в элементе e , причем

$$\left\{ \begin{array}{l}
a_{kt}^{xx} = \iiint_e \left(\frac{\partial b_k^e}{\partial y} \frac{\partial b_t^e}{\partial y} + \frac{\partial b_k^e}{\partial z} \frac{\partial b_t^e}{\partial z} \right) dx dy dz, \\
a_{kt}^{xy} = \frac{1}{2} \iiint_e \frac{\partial b_k^e}{\partial y} \frac{\partial b_t^e}{\partial x} dx dy dz, \\
a_{kt}^{xz} = \frac{1}{2} \iiint_e \frac{\partial b_k^e}{\partial z} \frac{\partial b_t^e}{\partial x} dx dy dz, \\
a_{kt}^{yy} = \iiint_e \left(\frac{\partial b_k^e}{\partial x} \frac{\partial b_t^e}{\partial x} + \frac{\partial b_k^e}{\partial z} \frac{\partial b_t^e}{\partial z} \right) dx dy dz, \\
a_{kt}^{yx} = \frac{1}{2} \iiint_e \frac{\partial b_k^e}{\partial x} \frac{\partial b_t^e}{\partial y} dx dy dz, \\
a_{kt}^{yz} = \frac{1}{2} \iiint_e \frac{\partial b_k^e}{\partial z} \frac{\partial b_t^e}{\partial y} dx dy dz, \\
a_{kt}^{zz} = \iiint_e \left(\frac{\partial b_k^e}{\partial x} \frac{\partial b_t^e}{\partial x} + \frac{\partial b_k^e}{\partial y} \frac{\partial b_t^e}{\partial y} \right) dx dy dz, \\
a_{kt}^{zx} = \frac{1}{2} \iiint_e \frac{\partial b_k^e}{\partial x} \frac{\partial b_t^e}{\partial z} dx dy dz, \\
a_{kt}^{zy} = \frac{1}{2} \iiint_e \frac{\partial b_k^e}{\partial y} \frac{\partial b_t^e}{\partial z} dx dy dz, \\
a_k^e = \iiint_e b_k^e dx dy dz.
\end{array} \right. \quad (7)$$

В (6) внешнее суммирование осуществляется по множеству E_k элементов, содержащих узел k , а внутреннее суммирование - по всем узлам i, j, k, m , содержащимся в элементе e . Таким образом, численный расчет трехмерного магнитного поля методом конечных элементов сводится к решению системы уравнений (6). Заметим, что для каждого узла k в (6) принимают участие только непосредственные соседи узла k . Таким образом, получается система уравнений с неизвестными A_k , причем количество уравнений равно количеству неизвестных и утроенному количеству краевых узлов.

2. Принцип доминирования диагонали. Рассмотрим систему линейных уравнений относительно неизвестных A_1, \dots, A_N с матрицей коэффициентов (a_{ni}) :

$$\sum_{i=1}^N a_{ni} A_i = d_n, \quad n = 1, 2, \dots, N. \quad (8)$$

Известен (см. [6]) достаточный признак сходимости итерационного процесса решения системы (8), называемый принципом доминирования диагонали: если диагональные элементы a_{nn} существенно превосходят недиагональные, то итерационный процесс решения системы (8) сходится. Рассмотрим разности

$$g_n = 1 - \frac{1}{|a_{nn}|} \sum_{i \neq n}^N |a_{ni}|, \quad n = 1, 2, \dots, N.$$

В соответствии с принципом доминирования диагонали, если для всех n величины g_n положительны, то итерационный процесс решения системы линейных уравнений (8) сходится при любом начальном приближении.

При численном решении системы уравнений используется понятие невязки. Под невязкой понимается максимальная разность двух последовательных приближений к решению. Если невязка стремится к нулю, то говорим, что процесс решения системы линейных уравнений сходится; если невязка стремится к бесконечности, то процесс решения расходится; если же невязка не имеет предела, то говорим, что процесс колеблется. Если величины g_n равны нулю или отрицательны, то в зависимости от начального приближения могут иметь место все три случая (сходимость, расходимость, колебательный процесс). При этом чем меньше величины g_n , тем сходимость менее вероятна.

3. Выделение геометрических характеристик системы расчетных уравнений. Преобразуем коэффициенты (7) так, чтобы выделить их геометрические характеристики. Из (4) получаем

$$\frac{\partial}{\partial z} b_j^e(x, y, z) = \frac{1}{3V_e} \begin{vmatrix} x_i & y_i & 1 \\ x_k & y_k & 1 \\ x_m & y_m & 1 \end{vmatrix} = \frac{2S_{ikm}^z}{3V_e},$$

$$\frac{\partial}{\partial y} b_j^e(x, y, z) = \frac{1}{3V_e} \begin{vmatrix} x_i & z_i & 1 \\ x_k & z_k & 1 \\ x_m & z_m & 1 \end{vmatrix} = \frac{2S_{ikm}^y}{3V_e},$$

$$\frac{\partial}{\partial x} b_j^e(x, y, z) = \frac{1}{3V_e} \begin{vmatrix} y_i & z_i & 1 \\ y_k & z_k & 1 \\ y_m & z_m & 1 \end{vmatrix} = \frac{2S_{ikm}^x}{3V_e},$$

$$\frac{\partial}{\partial z} b_k^e(x, y, z) = \frac{1}{3V_e} \begin{vmatrix} x_i & y_i & 1 \\ x_j & y_j & 1 \\ x_m & y_m & 1 \end{vmatrix} = \frac{2S_{ijm}^z}{3V_e},$$

$$\frac{\partial}{\partial y} b_k^e(x, y, z) = \frac{1}{3V_e} \begin{vmatrix} x_i & z_i & 1 \\ x_j & z_j & 1 \\ x_m & z_m & 1 \end{vmatrix} = \frac{2S_{ijm}^y}{3V_e},$$

$$\frac{\partial}{\partial x} b_k^e(x, y, z) = \frac{1}{3V_e} \begin{vmatrix} y_i & z_i & 1 \\ y_j & z_j & 1 \\ y_m & z_m & 1 \end{vmatrix} = \frac{2S_{ijm}^x}{3V_e},$$

где S_{ikm}^x (S_{ikm}^y, S_{ikm}^z) - площадь проекции треугольника с вершинами i, k, m на плоскость, перпендикулярную координатной оси x (соотв. y, z) (рис 1); S_{ijm}^x (S_{ijm}^y, S_{ijm}^z) - площадь проекции треугольника с вершинами i, j, m на плоскость, перпендикулярную координатной оси x (соотв. y, z). Согласно свойству проекции, имеем $S_{ikm}^z = S_{ikm} \cos \beta_{xy}^i$, $S_{ikm}^y = S_{ikm} \cos \beta_{xz}^i$, $S_{ikm}^x = S_{ikm} \cos \beta_{yz}^i$, где β_{xy}^i - угол между плоскостью треугольника с вершинами i, k, m и плоскостью $хоу$; β_{xz}^i - угол между плоскостью треугольника с вершинами i, k, m и плоскостью $хоз$; β_{yz}^i - угол между плоскостью треугольника с вершинами i, k, m и плоскостью $уоз$.

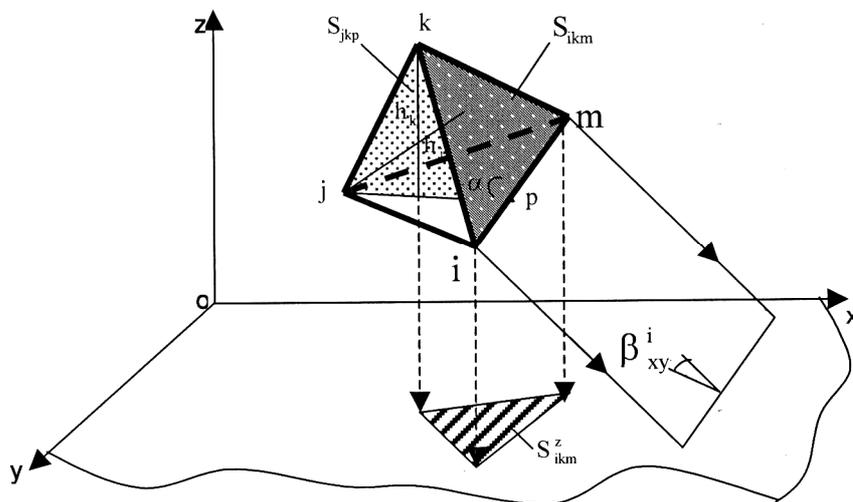


Рис. 1

Объем и площадь связаны соотношением $3V_e = S_{ikm} h_j$ или $3V_e = S_{ijm} h_k$, где h_j - высота, опущенная из вершины j на противоположную плоскость тетраэдра e ; h_k - высота, опущенная из вершины k на противоположную плоскость тетраэдра e . Следовательно,

$$\begin{aligned}\frac{\partial}{\partial z} b_j^e(x, y, z) &= \frac{2}{h_j} \cos \beta_{xy}^j, \\ \frac{\partial}{\partial y} b_j^e(x, y, z) &= \frac{2}{h_j} \cos \beta_{xz}^j, \\ \frac{\partial}{\partial x} b_j^e(x, y, z) &= \frac{2}{h_j} \cos \beta_{yz}^j, \\ \frac{\partial}{\partial z} b_k^e(x, y, z) &= \frac{2}{h_k} \cos \beta_{xy}^k, \\ \frac{\partial}{\partial y} b_k^e(x, y, z) &= \frac{2}{h_k} \cos \beta_{xz}^k, \\ \frac{\partial}{\partial x} b_k^e(x, y, z) &= \frac{2}{h_k} \cos \beta_{yz}^k.\end{aligned}$$

Написав аналогичные уравнения для остальных вершин j, k, m и подставив их в (7), получим

$$\left\{ \begin{aligned}\iiint_e \frac{\partial b_k^e}{\partial z} \frac{\partial b_j^e}{\partial z} dx dy dz &= \frac{4V_e}{h_k h_j} \cos \beta_{xy}^k \cos \beta_{xy}^j, \\ \iiint_e \frac{\partial b_k^e}{\partial y} \frac{\partial b_j^e}{\partial y} dx dy dz &= \frac{4V_e}{h_k h_j} \cos \beta_{xz}^k \cos \beta_{xz}^j, \\ \iiint_e \frac{\partial b_k^e}{\partial y} \frac{\partial b_j^e}{\partial x} dx dy dz &= \frac{4V_e}{h_k h_j} \cos \beta_{xz}^k \cos \beta_{yz}^j, \\ \iiint_e \frac{\partial b_k^e}{\partial z} \frac{\partial b_j^e}{\partial x} dx dy dz &= \frac{4V_e}{h_k h_j} \cos \beta_{xy}^k \cos \beta_{yz}^j, \\ \iiint_e \frac{\partial b_k^e}{\partial x} \frac{\partial b_j^e}{\partial x} dx dy dz &= \frac{4V_e}{h_k h_j} \cos \beta_{yz}^k \cos \beta_{yz}^j,\end{aligned}\right. \quad (9)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \iiint_e \frac{\partial b_k^e}{\partial x} \frac{\partial b_j^e}{\partial y} dx dy dz = \frac{4V_e}{h_k h_j} \cos \beta_{yz}^k \cos \beta_{xz}^j, \\ \iiint_e \frac{\partial b_k^e}{\partial z} \frac{\partial b_j^e}{\partial y} dx dy dz = \frac{4V_e}{h_k h_j} \cos \beta_{xy}^k \cos \beta_{xz}^j, \\ \iiint_e \frac{\partial b_k^e}{\partial x} \frac{\partial b_j^e}{\partial z} dx dy dz = \frac{4V_e}{h_k h_j} \cos \beta_{yz}^k \cos \beta_{xy}^j, \\ \iiint_e \frac{\partial b_k^e}{\partial y} \frac{\partial b_j^e}{\partial z} dx dy dz = \frac{4V_e}{h_k h_j} \cos \beta_{xz}^k \cos \beta_{xy}^j. \end{array} \right.$$

Из (6) и (9) получаем уравнение для расчета потенциала A_k^x с перенесенным влево диагональным элементом

$$\begin{aligned} & \sum_{e \in E_k} v_e \frac{4V_e}{(h_k^e)^2} (\cos^2 \beta_{xy}^k + \cos^2 \beta_{xz}^k) A_k^x = \\ & = \sum_{e \in E_k} v_e \sum_{t=i,j,m} \frac{V_e}{h_t^e h_k^e} [(\cos \beta_{xy}^k \cos \beta_{xy}^t + \cos \beta_{xz}^k \cos \beta_{xz}^t) A_t^x - \\ & - \cos \beta_{xz}^k \cos \beta_{yz}^j A_t^y - \cos \beta_{xy}^k \cos \beta_{yz}^j A_t^z] - \delta^x a_k^e. \end{aligned} \quad (10)$$

Согласно (10), недиагональные элементы k -й строки матрицы системы линейных уравнений будут больше, чем диагональный элемент данной строки, если

$$\frac{V_e}{h_t^e h_k^e} \gg \frac{V_e}{(h_k^e)^2}, \quad (11)$$

т.е. если в сетке существует тетраэдр e с существенно разными длинами высот $h_t^e \ll h_k^e$. В соответствии с принципом доминирования диагонали в таком случае итерационный процесс расходится.

Заметим, что входящие в (10) величины типа $\cos \beta_{xy}^t$ не влияют на сходимость процесса, так как не могут все одновременно быть близкими к нулю. Действительно, $\cos \beta_{xy}^i = 0$, если плоскость треугольника с вершинами j, k, m перпендикулярна координатной плоскости xoy . Но никакая плоскость не может быть перпендикулярной всем трем координатным плоскостям одновременно. Следовательно, при $h_t^e \ll h_k^e$ хотя бы один недиагональный элемент k -й строки матрицы будет больше, чем диагональный элемент данной строки.

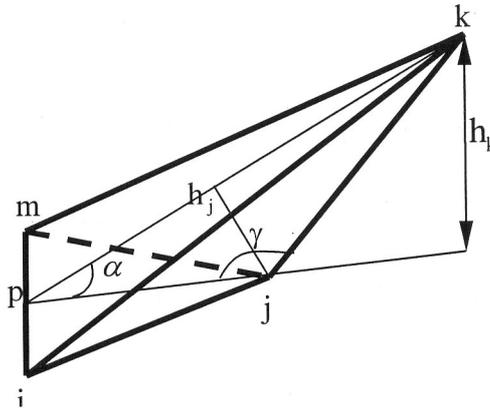


Рис. 2

Условие (11) накладывает ограничение и на углы тетраэдра. Рассмотрим плоскость, перпендикулярную ребру im (рис. 2). Имеем $3V_e = S_{jkr} l_{im}$, где S_{jkr} - площадь образуемого треугольника с вершинами j, k, p ; l_{im} - длина ребра с вершинами i и m . Определим, каким должен быть угол α между плоскостями треугольников с вершинами i, j, m и i, k, m , чтобы выполнялось условие (11).

Зафиксируем высоту h_k^e и площадь S_{jkr} . Для высот имеем пропорцию $dh_j^e = ch_k^e$, где d - длина стороны (k, p) ; c - длина стороны (j, p) . Заметим, что величина $c = \frac{S_{jkr}}{2h_k^e}$ тоже фиксирована. По теореме Пифагора имеем

$$d^2 = h_k^2 + (c - h_k \operatorname{ctg} \gamma)^2.$$

Следовательно,

$$h_i^e = \frac{c}{d} h_k^e = \frac{c}{\sqrt{1 + \left(\frac{c}{h_k^e} - \operatorname{ctg} \gamma \right)^2}}.$$

Отсюда видно, что при фиксированных высоте h_k^e и площади S_{ijp} вторая высота тетраэдра может быть малой длины только тогда, когда $\operatorname{ctg} \gamma < 0$, т.е. при тупом угле. И так, как и в двумерном случае, наличие в сетке тупоугольных тетраэдров отрицательно сказывается на сходимости процесса решения. Оценим критическое значение тупого угла γ , при превышении которого итерационный процесс расходится.

4. Оценка критического угла в тетраэдрической сетке. Рассмотрим в трехмерном пространстве выпуклый многогранник. Известна классическая формула Эйлера, которая

связывает количество граней G , ребер R и вершин W любого выпуклого многогранника:

$$G - R + W = 2.$$

Предположим, что все грани многогранника являются треугольниками. Тогда каждая грань содержит три ребра и каждое ребро лежит на границе двух граней. Следовательно, $3G = 2R$. Подставляя полученное значение в формулу Эйлера, получим

$$W = 2 - G + \frac{3}{2}G = 2 + \frac{1}{2}G. \quad (12)$$

Добавим внутри многогранника вершину (узел) O и соединим ее со всеми вершинами W . Так как все грани многогранника являются треугольниками, то получим непересекающиеся тетраэдры с общей вершиной O . Заметим, что количество тетраэдров равно количеству граней выпуклого многогранника. Тогда количество узлов W , соединенных с O , вычисляется формулой (1).

Таким образом, для любой тетраэдрической сетки и любого ее внутреннего узла число O тетраэдров G , содержащих узел O , обязательно четное и связано с числом W соседних узлов соотношением (12).

Для правильного тетраэдра телесный угол при каждой вершине равен $\pi/6$, а полный телесный угол равен площади единичной сферы 4π . Следовательно, узел можно окружить 24 правильными тетраэдрами. Согласно (12), такой узел будет иметь 14 соседних узлов.

Следовательно, для любой тетраэдрической сетки число тетраэдров, содержащих данный узел, в среднем равно 24, а число узлов, соседствующих с данным узлом, в среднем равно 14.

Учитывая полученную среднюю оценку, предположим, что вершина тупого угла соседствует с 14 узлами. Если

$$\frac{V_e}{h_j^e h_k^e} > 14 \frac{V_e}{(h_k^e)^2}, \quad (13)$$

то в матрице расчетной системы уравнений элемент k -й строки и j -го столбца будет больше диагонального элемента этой строки. Из рис. 2 видно, что

$$S_{jkp} = \frac{h_j h_k}{2 \sin \alpha}.$$

Следовательно, условие (13) будет выполнено, если $\sin \alpha < \frac{1}{7}$, т.е. $\alpha < 8,2^\circ$. Последнее неравенство заведомо выполняется, если $\gamma > 163,6^\circ$.

Выводы. Если в тетраэдрической сетке, используемой при численном расчете трехмерного магнитного поля методом конечных элементов, у всех тетраэдров все 4 высоты имеют длины одного порядка, то при подходящем выборе начального приближения итерационный процесс сходится. Наличие в сетке тупоугольных треугольников отрицательно сказывается на сходимости процесса решения. Если существуют тетраэдры с тупыми углами

большими, чем $\gamma > 163,6^\circ$, то итерационный процесс решения полевой задачи заведомо расходится.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Терзян А.А., Сукиасян Г.С., Пароникян А.Е.** О расчете магнитных полей методом конечных элементов с динамической композицией элементов дискретизации // Известия НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. - 2005. - Т. 58, №2. – С. 332-339.
2. **Терзян А.А., Сукиасян Г.С., Пароникян А.Е.** Об углах треугольной сетки для расчета магнитных полей методом конечных элементов // Известия НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. - 2007. - Т. 60, №3. – С. 523-532.
3. **Новик Я.А.** Вариационная формулировка решения задачи расчета трехмерного стационарного магнитного поля с учетом нелинейных свойств среды // Изв. АН ЛатвССР. Сер. физ. и техн. наук. - 1974. - №4. - С.79-89.
4. **Терзян А.А.** Автоматизированное проектирование электрических машин. – М.: Энергоатомиздат, 1983.- 256 с.
5. **Терзян А.А., Джавадян А.Д., Рымша В.В., Бородина Е.И.** Трехмерное магнитное поле линейного индукторного двигателя постоянного тока // Электричество. - 1991.- №11.- С. 42-47.
6. **Бронштейн И.Н., Семендяев К.А.** Справочник по математике. - М.:Наука,1986. - 544 с.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 14.04.2008.

Հ. Ա. ԹԵՐԶՅԱՆ, Հ.Ս. ՍՈՒԲԻԱՍՅԱՆ, Ա.Է. ՀԱԿՈԲՅԱՆ ՎԵՐՋԱՎՈՐ ՏԱՐԻԵՐԻ ԵՂԱՆԱԿՈՎ ԵՌԱԶՈՓ ՄԱԳՆԻՏԱԿԱՆ ԴԱՇՏԵՐԻ ՀԱՇՎԱՐԿԻ ՎԵՐԱԲԵՐՅԱԼ

Ստացված և հետազոտված են վերջավոր տարրերի եղանակով եռաչափ ոչ գծային դաշտային խնդիրների թվային լուծման ժամանակ առաջացած հավասարումների համակարգի երկրաչափական բնութագրերը: Ապացուցված է քառանիստային ցանցում բութ անկյունների առկայության բացասական ազդեցությունը իտերացիոն գործընթացի զուգամիտման վրա: Տրված է կրիտիկական անկյան գնահատականը, որի գերազանցման դեպքում խնդիրը տարամիտում է:

Առանցքային բառեր. էլեկտրամագնիսական դաշտ, վերջավոր տարրերի մեթոդ, եռաչափ քառանիստ ցանցեր:

H.A. TERZYAN, H. S. SUKIASYAN, A.E. HAKOBYAN ON COMPUTATION OF THREE-DIMENSIONAL MAGNETIC FIELDS BY FINITE-ELEMENT METHOD

The geometric characteristics of equation system for numeric solution of three-dimensional nonlinear field problems by the finite-element method are obtained and investigated. The negative impact of obtuse angle existence in tetrahedral mesh on convergence of iteration process is proved. The estimation of a critical angle is given at the excess of which the problem is diverged.

Keywords: electromagnetic field, finite-element method, three-dimensional tetrahedral mesh.

Ս.Հ. ՄԻՄՈՆՅԱՆ, Ա.Գ. ԱՎԵՏԻՍՅԱՆ, Դ.Ա. ՂԱԶԱՐՅԱՆ

**ԱՍՐԱԿԱՅՎԱԾ ԵԶՐԱՅԻՆ ՊԱՅՄԱՆՆԵՐՈՎ ԳԾԱՅԻՆ
ԱՐԱԳԱԳՈՐԾՈՒԹՅԱՆ ԽՆԴԻՐՆԵՐԻ ԼՈՒԾՈՒՄԸ ԴԻՖԵՐԵՆՑԻԱԼ
ԶԵՎԱՓՈԽՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՏԻՐՈՒՅԹՈՒՄ**

Դիտարկվում են ամրակայված եզրային պայմաններով գծային արագագործության խնդիրները, որոնց լուծման համար որպես հիմնական մաթեմատիկական ապարատ են ծառայում Գ.Ե. Պուխովի դիֆերենցիալ ձևափոխությունները: Ցույց են տրվում առաջարկված մոտեցման առավելությունները մի շարք հայտնի մեթոդների նկատմամբ:

Առանցքային բաներ. գծային արագագործություն, ամրակայված եզրային պայմաններ, բազմակետ եզրային խնդիրներ, դիֆերենցիալ ձևափոխություններ:

Դիտարկենք գծային արագագործության հետևյալ խնդիրը [1-4].

- որակի չափանիշը՝

$$I = \int_0^T 1 dt = T \rightarrow \min_{u(t)}, \quad (1)$$

- շարժման հավասարումները՝

$$\dot{X}(t) = AX(t) + bu(t), \quad (2)$$

- ամրակայված եզրային պայմանները՝

$$X(0) = \text{fix}, X(T) = \text{fix}, \quad (3)$$

- կառավարող ազդեցության վրա դրված սահմանափակումը՝

$$|u(t)| \leq 1, \quad (4)$$

որտեղ $X(t) = (x_1(t), \dots, x_n(t))^T$ -ն վիճակի փոփոխականների n չափանի վեկտորն է; $A = (a_{ij})$; $i, j = \overline{1, n}$ - ն՝ համակարգի հաստատուն տարրերից բաղկացած մատրիցը; $b = (b_1, \dots, b_n)^T$ -ն՝ $u(t)$ սկալյար կառավարող ազդեցության հաստատուն տարրերով վեկտոր-սյունը, T -ն՝ անցման ժամանակը:

Նախ ենթադրենք, որ համակարգը լրիվ կառավարելի է, և A մատրիցի բոլոր սեփական արժեքներն իրական բացասական են կամ զրոյական:

Մաթեմատիկական ապարատը

(1)-(4) խնդրի լուծումն իրականացնենք հետևյալ փուլերի կատարմամբ.

Փուլ 1

Լուծենք (2)-(3) եզրային խնդիրը: (2)-ը դիֆերենցիալ ձևափոխությունների տիրույթում [5] կունենա հետևյալ տեսքը.

$$X(K+1) = \frac{H}{K+1} \left(\sum_{P=0}^K [A(P) \cdot X(K-P) + b(P) \cdot U(K-P)] \right), \quad K=0,1,\dots, \quad (5)$$

որտեղ $X(K) = (X_1(K), \dots, X_n(K))^T$ -ն վիճակի փոփոխականների պատկերների վեկտորն է; $A(P)$ -ն՝ A մատրիցի P -րդ մատրիցային դիսկրետը, $b(P)$ -ն՝ b սյան P -րդ վեկտորային դիսկրետը, K -ն՝ դիսկրետի համարը; H -ը՝ մասշտաբային գործակիցը [2]:

Հաշվի առնելով, որ $A(P=0) \equiv A, A(P \geq 1) = [0]$, ինչպես նաև $b(P=0) \equiv b, b(P \geq 1) = (0)$, կունենանք.

$$X(K+1) = \frac{H}{K+1} (A \cdot X(K) + b \cdot U(K)), \quad K=0,1,\dots: \quad (6)$$

Մյուս կողմից՝ հայտնի է [1, 3, 4], որ այս դասի խնդիրների համար տեղի ունի Ֆելդբաումի հանրահայտ թեորեմը, որի համաձայն օպտիմալ կառավարումը կտոր առ կտոր հաստատուն նշանափոխ ֆունկցիա է, ընդ որում փոխանջատումների քանակը չի կարող գերազանցել $(n-1)$ -ը, այսինքն՝ յուրաքանչյուր ենթամիջակայքի վրա ունենք հաստատուն $u_i, i \in \overline{1, n}$ կառավարող ազդանշան: Ուստի կարող ենք ընդունել, որ

$$u_i = \begin{cases} +1 \\ \text{կամ} \\ -1 \end{cases} = U_i(0), \quad U(K \geq 1) \equiv 0, \quad i = \overline{1, n}, \quad : \text{ Վերջնականապես կունենանք.}$$

$$X(K+1) = \frac{H}{K+1} (AX(K) + bU(K)B(K)), \quad K=0,1,\dots \quad (7)$$

կամ

$$X(K+1) = H^{K+1} \cdot [B_{K+1} \cdot X(0) + C_{K+1}(U(0))], \quad K=0,1,\dots, \quad (8)$$

որտեղ $B_K, K=0,1,\dots$ պատկերներ-մատրիցները և $C_K(U(0)), K=0,1,\dots$ պատկերներ-վեկտորները որոշվում են հետևյալ անդրադարձ առնչությունների միջոցով.

$$B_{K+1} = \frac{1}{K+1} A \cdot B_K, \quad K=0,1,\dots, \quad (9)$$

$$C_{K+1}(U(0)) = \frac{1}{K+1} (A \cdot C_K(U(0)) + bU(K)B(K)), \quad K=0,1,\dots,$$

որտեղ $B_0 = E_{n \times n}$ -ն n չափանի միավոր մատրից է, $C_0 = (0)_{n \times 1}$ -ն՝ n չափանի զրոյական վեկտոր-սյուն:

Ըստ դիֆերենցիալ-թեյլորյան ձևափոխությունների $X(t)$ բնօրինակը կվերականգնվի հետևյալ կերպ.

$$\begin{aligned} X(t) &= X(0) + X(1)(t-t_0) + X(2)(t-t_0)^2 + \dots + X(K)(t-t_0)^K = \\ &= X(0) + (B_1 X(0) + C_1)(t-t_0) + (B_2 X(0) + C_2)(t-t_0)^2 + \dots + (B_K X(0) + C_K)(t-t_0)^K, \end{aligned} \quad (10)$$

$$T \rightarrow \min_{t_1, t_2, \dots, t_{n-1}, T, v_1, v_2, \dots, v_n, z_1, z_2, z_3},$$

$$\begin{cases} \Psi_{11}(t_1, t_2, \dots, t_{n-1}, T, v_1, v_2, \dots, v_n) - x_1(T) = 0, \\ \Psi_{12}(t_1, t_2, \dots, t_{n-1}, T, v_1, v_2, \dots, v_n) - x_2(T) = 0, \\ \vdots \\ \Psi_{1n}(t_1, t_2, \dots, t_{n-1}, T, v_1, v_2, \dots, v_n) - x_n(T) = 0; \end{cases} \quad (16 \text{ ա})$$

$$\begin{cases} \Psi_{21}(t_1, t_2, \dots, t_{n-1}, T, z_1, z_2, \dots, z_n) - x_1(T) = 0, \\ \Psi_{22}(t_1, t_2, \dots, t_{n-1}, T, z_1, z_2, \dots, z_n) - x_2(T) = 0, \\ \vdots \\ \Psi_{2n}(t_1, t_2, \dots, t_{n-1}, T, z_1, z_2, \dots, z_n) - x_n(T) = 0; \end{cases} \quad (16 \text{ բ})$$

Լուծելով ստացված խնդիրը՝ կստանանք V և Z լրացուցիչ փոփոխականների վեկտորների, նվազագույն T ժամանակի և փոխանջատման $t_i, i = \overline{1, n-1}$ պահերի արժեքները, որից հետո էլ՝ կառավարող ազդեցությունների արժեքները: Կոշու հավասարման ինտեգրումից հետո էլ, հաշվի առնելով յուրաքանչյուր ենթախնդրի եզրային պայմանները, կստանանք վիճակի փոփոխականների ժամանակային կախվածությունները:

Օրինակ: Դիտարկենք գծային արագագործության հետևյալ խնդիրը [1,8].

$$T \rightarrow \min_{u(t)},$$

$$\begin{cases} \begin{pmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \\ \dot{x}_3(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_2(t) \\ x_3(t) \\ u(t) \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} u(t); \end{cases}$$

$$\begin{cases} x_1(0) = 2, \quad x_1(T) = 0, \\ x_2(0) = 0, \quad x_2(T) = 0, \\ x_3(0) = 0; \quad x_3(T) = 0; \end{cases}$$

$$|u(t)| \leq 1:$$

Առանց հաշվարկների մանրամասների մեջ խորանալու՝ ներկայացնենք համապատասխան արդյունքները: Ունենք՝

$$A(0) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad A(K \geq 1) = [0]; \quad b(0) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad b(K \geq 1) = (0);$$

$$B_1 = A(0) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B_2 = \frac{1}{2}(A(0)B_1 + A(1)) = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B_{\geq 3} = [0];$$

$$C_1 = b(0)U(0) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ U(0) \end{pmatrix}, \quad C_2 = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 0 \\ U(0) \\ 0 \end{pmatrix}, \quad C_3 = \frac{1}{6} \begin{pmatrix} U(0) \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad C_{\geq 4} = (0);$$

Փուլ 1

Ենթախնդիր 1

Ունենք՝

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = x_2(t), \\ \dot{x}_2(t) = x_3(t), \\ \dot{x}_3(t) = u_1(t); \\ x_1(0) = 2, \quad x_1(t_1) = x_{11}, \\ x_2(0) = 0, \quad x_2(t_1) = x_{12}, \\ x_3(0) = 0, \quad x_3(t_1) = x_{13}; \end{cases}$$

$$X(0)_0 = \begin{pmatrix} x_1(0) \\ x_2(0) \\ x_3(0) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad X(t_1) = \begin{pmatrix} x_1(t_1) \\ x_2(t_1) \\ x_3(t_1) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_{11} \\ x_{12} \\ x_{13} \end{pmatrix}:$$

Ուստի՝

$$X(t) = X(0)_0 + (B_1 X(0)_0 + C_1)t + (B_2 X(0)_0 + C_2)t^2 + (B_3 X(0)_0 + C_3)t^3 + \dots,$$

որտեղից $t = t_1$ դեպքում՝

$$X(t_1) = X(0)_0 + (B_1 X(0)_0 + C_1)t_1 + (B_2 X(0)_0 + C_2)t_1^2 + (B_3 X(0)_0 + C_3)t_1^3 + \dots = (x_{11}, x_{12}, x_{13})^T, \text{ կամ էլ՝}$$

$$\begin{pmatrix} 2 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} 2 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ u_1 \end{pmatrix} t_1 + \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} 2 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ u_1 \\ 0 \end{pmatrix} t_1^2 + \frac{1}{6} \begin{pmatrix} u_1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} t_1^3 = \mathbf{X}(t_1) = \begin{pmatrix} x_{11} \\ x_{12} \\ x_{13} \end{pmatrix} :$$

Վերջինից՝

$$\begin{cases} 2 + \frac{1}{6} u_1 t_1^3 = x_{11}, \\ \frac{1}{2} u_1 t_1^2 = x_{12}, \\ u_1 t_1 = x_{13} : \end{cases}$$

Ենթախնդիր 2

Ունենք՝

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = x_2(t), \\ \dot{x}_2(t) = x_3(t), \\ \dot{x}_3(t) = u_2(t); \end{cases}$$

$$\mathbf{X}(0)_1 = \mathbf{X}(t_1) = \begin{pmatrix} x_{11} \\ x_{12} \\ x_{13} \end{pmatrix}, \quad \mathbf{X}(t_2) = \begin{pmatrix} x_1(t_2) \\ x_2(t_2) \\ x_3(t_2) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_{21} \\ x_{22} \\ x_{23} \end{pmatrix} :$$

Ուստի՝

$$\begin{aligned} \mathbf{X}(t) = & \mathbf{X}(0)_1 + (\mathbf{B}_1 \mathbf{X}(0)_1 + \mathbf{C}_1)(t - t_1) + (\mathbf{B}_2 \mathbf{X}(0)_1 + \mathbf{C}_2)(t - t_1)^2 + \\ & + (\mathbf{B}_3 \mathbf{X}(0)_1 + \mathbf{C}_3)(t - t_1)^3 + \dots, \end{aligned}$$

որտեղից $t = t_2$ դեպքում՝

$$\begin{aligned} \mathbf{X}(t_2) = & \mathbf{X}(0)_1 + (\mathbf{B}_1 \mathbf{X}(0)_1 + \mathbf{C}_1)(t_2 - t_1) + (\mathbf{B}_2 \mathbf{X}(0)_1 + \mathbf{C}_2)(t_2 - t_1)^2 + \\ & + (\mathbf{B}_3 \mathbf{X}(0)_1 + \mathbf{C}_3)(t_2 - t_1)^3 + \dots = (x_{21}, x_{22}, x_{23})^T, \end{aligned}$$

կամ էլ՝

$$\begin{pmatrix} x_{11} \\ x_{12} \\ x_{13} \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x_{11} \\ x_{12} \\ x_{13} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ u_2 \end{pmatrix} (t_2 - t_1) + \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x_{11} \\ x_{12} \\ x_{13} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ u_2 \\ 0 \end{pmatrix} (t_2 - t_1)^2 + \frac{1}{6} \begin{pmatrix} u_2 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} (t_2 - t_1)^3 = \mathbf{X}(t_2) = \begin{pmatrix} x_{21} \\ x_{22} \\ x_{23} \end{pmatrix} :$$

Վերջինից՝

$$\begin{cases} x_{11} + x_{12}(t_2 - t_1) + \frac{1}{2}x_{13}(t_2 - t_1)^2 + \frac{1}{6}u_2(t_2 - t_1)^3 = x_{21}, \\ x_{12} + x_{13}(t_2 - t_1) + \frac{1}{2}u_2(t_2 - t_1)^2 = x_{22}, \\ x_{13} + u_2(t_2 - t_1) = x_{23} : \end{cases}$$

Նյութախնդիր 3

Ունենք՝

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = x_2(t), \\ \dot{x}_2(t) = x_3(t), \\ \dot{x}_3(t) = u_3(t); \end{cases}$$

$$\mathbf{X}(0)_2 = \mathbf{X}(t_2) = \begin{pmatrix} x_{21} \\ x_{22} \\ x_{23} \end{pmatrix}, \quad \mathbf{X}(T) = \begin{pmatrix} x_1(T) \\ x_2(T) \\ x_3(T) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} :$$

Ուստի՝

$$\begin{aligned} \mathbf{X}(t) = & \mathbf{X}(0)_2 + (\mathbf{B}_1\mathbf{X}(0)_2 + \mathbf{C}_1)(t - t_2) + (\mathbf{B}_2\mathbf{X}(0)_2 + \mathbf{C}_2)(t - t_2)^2 + \\ & + (\mathbf{B}_3\mathbf{X}(0)_2 + \mathbf{C}_3)(t - t_2)^3 + \dots, \end{aligned}$$

որտեղից $t = T$ դեպքում՝

$$\begin{aligned} \mathbf{X}(T) = & \mathbf{X}(0)_2 + (\mathbf{B}_1\mathbf{X}(0)_2 + \mathbf{C}_1)(T - t_2) + (\mathbf{B}_2\mathbf{X}(0)_2 + \mathbf{C}_2)(T - t_2)^2 + \\ & + (\mathbf{B}_3\mathbf{X}(0)_2 + \mathbf{C}_3)(T - t_2)^3 + \dots = (0, 0, 0)^T, \end{aligned}$$

կամ էլ՝

$$\begin{pmatrix} x_{21} \\ x_{22} \\ x_{23} \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x_{21} \\ x_{22} \\ x_{23} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ u_3 \end{pmatrix} (T - t_2) + \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x_{21} \\ x_{22} \\ x_{23} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ u_3 \\ 0 \end{pmatrix} (T - t_2)^2 + \frac{1}{6} \begin{pmatrix} u_3 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} (T - t_2)^3 = X(T) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} :$$

Ոչ գծային ծրագրավորման խնդիրն ստանում է հետևյալ տեսքը.

$$T \rightarrow \min_{x_{21}, x_{22}, x_{23}, t_2, T, u_3} ;$$

$$\begin{cases} x_{21} + x_{22}(T - t_2) + \frac{1}{2}x_{23}(T - t_2)^2 + \frac{1}{6}u_3(T - t_2)^3 = 0, \\ x_{22} + x_{23}(T - t_2) + \frac{1}{2}u_3(T - t_2)^2 = 0, \\ x_{23} + u_3(T - t_2) = 0 : \end{cases}$$

Հաշվի առնելով նախորդ ենթախնդիրներում ստացված արժեք-կախվածությունները, վերջնականապես ոչ գծային ծրագրավորման $2n = 6$ հատ փոփոխականներով խնդիրը կունենա հետևյալ տեսքը.

$$T \rightarrow \min_{t_1, t_2, T, u_1, u_2, u_3} ;$$

$$\begin{cases} 2 + \frac{1}{6}u_1t_1^3 + \frac{1}{2}u_1t_1^2(t_2 - t_1) + \frac{1}{2}u_1t_1(t_2 - t_1)^2 + \frac{1}{6}u_2(t_2 - t_1)^3 + (\frac{1}{2}u_1t_1^2 + u_1t_1(t_2 - t_1) + \frac{1}{2}u_2(t_2 - t_1)^2)(T - t_2) + (\frac{1}{2}u_1t_1 + \frac{1}{2}u_2(t_2 - t_1))(T - t_2)^2 + \frac{1}{6}u_3(T - t_2)^3 = 0, \\ \frac{1}{2}u_1t_1^2 + u_1t_1(t_2 - t_1) + \frac{1}{2}u_2(t_2 - t_1)^2 + (u_1t_1 + u_2(t_2 - t_1))(T - t_2) + \frac{1}{2}u_3(T - t_2)^2 = 0, \\ u_1t_1 + u_2(t_2 - t_1) + u_3(T - t_2) = 0 : \end{cases}$$

Փուլ 2.

Լրացուցիչ փոփոխականների V և Z վեկտորների ներմուծումից հետո ստացված խնդիրն ունի այսպիսի տեսք.

$$T \rightarrow \min_{t_1, t_2, T, v_1, v_2, v_3, z_1, z_2, z_3} ;$$

$$\left\{ \begin{array}{l}
2 + \frac{1}{6}(1 - v_1^2)t_1^3 + \frac{1}{2}(1 - v_1^2)t_1^2(t_2 - t_1) + \frac{1}{2}(1 - v_1^2)t_1(t_2 - t_1)^2 + \\
+ \frac{1}{6}(1 - v_2^2)(t_2 - t_1)^3 + \left(\frac{1}{2}(1 - v_1^2)t_1^2 + (1 - v_1^2)t_1(t_2 - t_1) + \right. \\
\left. + \frac{1}{2}(1 - v_2^2)(t_2 - t_1)^2\right)(T - t_2) + \left(\frac{1}{2}(1 - v_1^2)t_1 + \frac{1}{2}(1 - v_2^2)(t_2 - t_1)\right)(T - t_2)^2 + \\
\left. + \frac{1}{6}(1 - 6v_3^2)(T - t_2)^3 = 0, \right. \\
\frac{1}{2}(1 - v_1^2)t_1^2 + (1 - v_1^2)t_1(t_2 - t_1) + \frac{1}{2}(1 - v_2^2)(t_2 - t_1)^2 + ((1 - v_1^2)t_1 + \\
+ (1 - v_2^2)(t_2 - t_1))(T - t_2) + \frac{1}{2}(1 - v_3^2)(T - t_2)^2 = 0, \\
(1 - v_1^2)t_1 + (1 - v_2^2)(t_2 - t_1) + (1 - v_3^2)(T - t_2) = 0; \\
\left. \left\{ \begin{array}{l}
2 + \frac{1}{6}(-1 + z_1^2)t_1^3 + \frac{1}{2}(-1 + z_1^2)t_1^2(t_2 - t_1) + \frac{1}{2}(-1 + z_1^2)t_1(t_2 - t_1)^2 + \\
+ \frac{1}{6}(-1 + z_2^2)(t_2 - t_1)^3 + \left(\frac{1}{2}(-1 + z_1^2)t_1^2 + (-1 + z_1^2)t_1(t_2 - t_1) + \right. \\
\left. + \frac{1}{6}(-1 + z_2^2)(t_2 - t_1)^2\right)(T - t_2) + \left(\frac{1}{2}(-1 + z_1^2)t_1 + \right. \\
\left. + \frac{1}{2}(-1 + z_2^2)(t_2 - t_1)\right)(T - t_2)^2 + \frac{1}{6}(-1 + z_3^2)(T - t_2)^3 = 0, \\
\frac{1}{2}(-1 + z_1^2)t_1^2 + (-1 + z_1^2)t_1(t_2 - t_1) + \frac{1}{2}(-1 + z_2^2)(t_2 - t_1)^2 + \\
+ ((-1 + z_1^2)t_1 + (-1 + z_2^2)(t_2 - t_1))(T - t_2) + \frac{1}{2}(-1 + z_3^2)(T - t_2)^2 = 0, \\
(-1 + z_1^2)t_1 + (-1 + z_2^2)(t_2 - t_1) + (-1 + z_3^2)(T - t_2) = 0 :
\end{array} \right.
\end{array} \right.$$

Ստացված ոչ գծային ծրագրավորման խնդիրը Լագրանժի եղանակով լուծելիս իրականացվել են համապատասխան ոչ գծային հավասարումների համակարգի (15 հավասարում՝ 15 անհայտով) լուծման բազմատարբերակային փորձարկումներ [9]-ում ներկայացված եղանակով, որոնցից 8-ի արդյունքները բերված են աղյ. 1 -ում, որտեղ N-ը՝ փորձարկման համարն է, $k_i, i = \overline{1,6}$ - երը Լագրանժի անորոշ բազմապատկիչներն են, իսկ 0 և * նշանները մատնանշում են համապատասխան փոփոխականների ընտրված նախնական և լուծման արդյունքում ստացված վերջնական մոտավորությունների արժեքները: Լուծումները

փնտրվել են $\rho = \max_i |\varepsilon_i| \leq 10^{-3}$ ճշտությամբ, որտեղ ε_i -ն, $i = \overline{1,15} - i$ – րդ հավասարման անհամաձայնությունն է:

Աղյուսակ 1

N	T^0	t_1^0	t_2^0	v_1^0	v_2^0	v_3^0	z_1^0	z_2^0	z_3^0
	T^*	t_1^*	t_2^*	v_1^*	v_2^*	v_3^*	z_1^*	z_2^*	z_3^*
1	4	1	3	2	0	2	0	2	1
	4	1	3	1,4142	0	1,4142	0	1,4142	0
2	2,7789	0,3926	1,8306	1,4153	0	0,7975	0	0,983	0
	4	1	3	1,4142	0	1,4142	0	1,4142	0
3	-4	-1	-3	1,4142	0	1,4142	0	1,4142	0
	4	1	3	1,4142	0	1,4142	0	1,4142	0
4	1	1	3	1,4142	0	1,4142	0	1,4142	0
	3,9995	1	2,9998	1,4142	0	1,4142	0	1,4142	0
5	0	1	3	1,4142	0	1,4142	0	1,4142	0
	3,9999	1	3	1,4142	0	1,4142	0	1,4142	0
6	4	10	3	1,4142	0	1,4142	0	1,4142	0
	4	1	3	1,4142	0	1,4142	0	1,4142	0
7	10	2	3	1,4142	0	2	0	1,4142	0
	4	1	3	1,4142	0	1,4142	0	1,4142	0
8	8	2	3	5	0	2	0	1	0
	4,0001	0,9999	3,0002	1,4143	0	1,4143	0	1,4141	0

Աղյուսակ 1 –ի շարունակությունը

N	k_1^0	k_2^0	k_3^0	k_4^0	k_5^0	k_6^0	Իտ, քանակ
	k_1^*	k_2^*	k_3^*	k_4^*	k_5^*	k_6^*	
1	1	12	5	2	3	4	8
	0,2222	-0,4444	0,1852	0,4444	-0,8889	0,8148	
2	0,1553	-0,282	0,1323	0,3079	-0,5988	0,5662	14
	0,2222	-0,4444	0,1852	0,4444	-0,8889	0,8148	
3	1	2	5	2	3	4	216
	0,2223	-0,4445	0,1852	0,4444	-0,8889	0,8148	
4	1	2	5	2	3	4	98
	0,2218	-0,4434	0,1844	0,4452	-0,8904	0,8162	
5	1	2	5	2	3	4	121
	0,2224	-0,4449	0,1854	0,4444	-0,8886	0,8144	
6	1	2	5	2	3	4	16
	0,2222	-0,4444	0,1852	0,4444	-0,8889	0,8148	
7	1	0	2	1	3	5	225
	0,2218	-0,4435	0,1848	0,4446	-0,8893	0,8153	
8	1	0	1	1	2	5	1398
	0,2223	-0,4445	0,1852	0,4446	-0,8892	0,815	

Ըստ ստացված արդյունքների ակնհայտ է, որ միակ լուծումը՝

$$T = 4, t_1 = 1, t_2 = 3,$$

$$v_1 = 1.4142, v_2 = 0, v_3 = 1.4142,$$

$$z_1 = 0, z_2 = 1.4142, z_3 = 0,$$

որից հետո էլ հեշտ է որոշել յուրաքանչյուր ենթամիջակայքի վրա կառավարող ազդեցությունը.

$$u_1 = 1 - v_1^2 = 1 - 1.4142^2 = -1,$$

$$u_2 = 1 - v_2^2 = 1 - 0^2 = 1,$$

$$u_3 = 1 - v_3^2 = 1 - 1.4142^2 = -1:$$

Ունենալով յուրաքանչյուր ենթամիջակայքի u_i , $i = \overline{1, n}$ կառավարող ազդեցությունները, հաշվի առնելով ստացված նվազագույն $T = 4$ արժեքը, փոխանջատման $t_1 = 1, t_2 = 3$ պահերը և յուրաքանչյուր ենթախնդրի եզրային պայմաններից որոշվող ինտեգրման հաստատունների արժեքները՝ կունենանք աղյ.2-ը:

Աղյուսակ 2

	$t \in [0, t_1] = [0, 1]$	$t \in [t_1, t_2] = [1, 3]$	$t \in [t_2, T] = [3, 4]$
$x_1(t)$	$2 - \frac{1}{6}t^3$	$\frac{1}{6}t^3 - t^2 + t + \frac{10}{6}$	$-\frac{1}{6}t^3 + 2t^2 - 8t + \frac{64}{6}$
$x_2(t)$	$-\frac{1}{2}t^2$	$\frac{1}{2}t^2 - 2t + 1$	$-\frac{1}{2}t^2 + 4t - 8$
$x_3(t)$	$-t$	$t - 2$	$-t + 4$

Գերսևանովի փոխանջատիչների [5] միջոցով վիճակի փոփոխականների և կառավարող ազդեցության համար կունենանք հետևյալ անալիտիկ առնչությունները՝

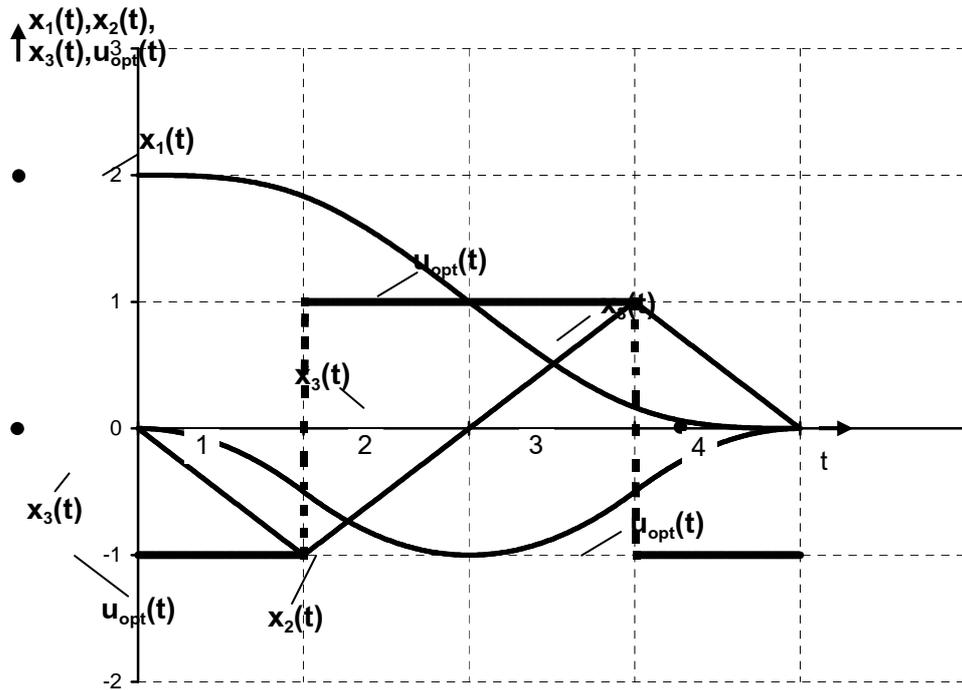
$$x_1(t) = \gamma_0^1 \left(2 - \frac{1}{6}t^3 \right) + \gamma_1^3 \left(\frac{1}{6}t^3 - t^2 + t + \frac{10}{6} \right) + \gamma_3^4 \left(-\frac{1}{6}t^3 + 2t^2 - 8t + \frac{64}{6} \right),$$

$$x_2(t) = \gamma_0^1 \left(-\frac{1}{2}t^2 \right) + \gamma_1^3 \left(\frac{1}{2}t^2 - 2t + 1 \right) + \gamma_3^4 \left(-\frac{1}{2}t^2 + 4t - 8 \right),$$

$$x_3(t) = \gamma_0^1 (-t) + \gamma_1^3 (t - 2) + \gamma_3^4 (-t + 4);$$

$$u_{opt}(t) = \gamma_0^1 (-1) + \gamma_1^3 (1) + \gamma_3^4 (-1):$$

Վիճակի փոփոխականների և կառավարող ազդեցության ժամանակային կախվածությունները ներկայացված են նկ. - ում:



Նկ. Վիճակի փոփոխականների և կառավարող ազդեցության ժամանակային կախվածությունները

Ընդհանրացում: Այսպիսով առաջարկված մոտեցման դեպքում, ի տարբերություն [1-4, 8]-ի, անհրաժեշտություն չկա որոշել.

- 1) A մատրիցի սեփական թվերը, սեփական վեկտորները և հիմնարար մատրիցը,
- 2) $u_{opt}(t)$ կառավարող ազդեցության նշանները նրա հաստատունության առանձին միջակայքերի վրա,

3) $u_{opt}(t)$ -ի ստացումն ապահովող համալուծ փոփոխականների սկզբնական արժեքների ոչ զրոյական վեկտորի բաղադրիչները,

- 4) լրացուցիչ անհրաժեշտ թվով որոշիչային հավասարումները [1]:

Այս և մի շարք ուրիշ հանգամանքներով պայմանավորված են առաջարկված մոտեցման սկզբունքային առավելությունները այլ մոտեցումների նկատմամբ:

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. Միմոնյան Ս.Հ. Օպտիմալ կառավարման կիրառական տեսություն. - Երևան, 2005.- 180 էջ:
2. Брайсон А., Хо Ю-Ши. Прикладная теория оптимального управления.- М.: Мир, 1972.-554 с.
3. Понтрягин Л.С., Болтянский В.Г., Гамкрелидзе Р.В., Мищенко Е.Ф. Математическая теория оптимальных процессов. - М.: Наука, 1983. - 392 с.
4. Фельдбаум А.А. Основы теории оптимальных автоматических систем. - М.: Наука, 1966. - 623 с.
5. Пухов Г.Е. Дифференциальные спектры и модели. - Киев: Наукова думка, 1990. - 184с.
6. Միմոնյան Ս.Հ., Ավետիսյան Ա.Գ., Ղազարյան Դ.Ա. Գծային բազմակետ եզրային խնդիրների լուծման մեթոդ՝ հիմնված դիֆերենցիալ-դիրիխլեյան ձևափոխությունների վրա // ՀՃԱ Լրաբեր. - 2007. - Հ.4, N 2. - էջ 253-257:
7. Симонян С.О., Аветисян А.Г. Прямой метод решения линейных многоточечных краевых задач // Известия НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. -2002. -Т. LV, N 1. - С.95-103.
8. Симонян С.О. Основы синтеза специализированных вычислителей динамических задач нелинейного программирования: Автореф. дис. ...д.т.н. - Ереван, 1993. - 47 с.
9. Simonyan S.H., Avetissyan A.G. Jordanian Reduction of Finite Systems of the Effective Method of their Solution //The Problems of the Efficiency Improvements of the Control Systems of Technological Processes / Armenian National Committee of Automatic Control. - Yerevan, 1992. - Vol. 3.-P. 11.

ՀՊՃՀ. Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 14.12.2007.

С.О. СИМОНЯН, А.Г. АВETИСЯН, Д.А. КАЗАРЯН

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ЛИНЕЙНОГО БЫСТРОДЕЙСТВИЯ С ЗАКРЕПЛЕННЫМИ КРАЕВЫМИ УСЛОВИЯМИ В ОБЛАСТИ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ

Рассматриваются линейные задачи быстрого действия с закрепленными краевыми условиями, для решения которых основным математическим аппаратом служат дифференциальные преобразования Г.Е. Пухова. Показываются достоинства предложенного подхода по сравнению с рядом известных методов.

Ключевые слова: линейные задачи быстрого действия, закрепленные краевые условия, многоточечные краевые задачи, дифференциальные преобразования.

S.H. SIMONYAN, A.G. AVETISYAN, D.A. GHAZARYAN

SOLUTION OF LINEAR SPEED PROBLEMS WITH FIXED BOUNDARY CONDITIONS IN THE DOMAIN OF DIFFERENTIAL TRANSFORMATIONS

Linear speed problems with fixed boundary conditions for the solution of which Pukhov's differential transformations serve as a main mathematical apparatus are considered. The merits of the proposed approach with respect to a number of known methods are shown.

Keywords: linear speed problems, fixed boundary conditions, multipoint boundary value problem, differential transformations.

Р.М. ХАЧАТРЯН

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОЧНОГО ЗНАЧЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ НАСОСНОЙ
СТАНЦИИ ПРИ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАБОТЕ
ЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАСОСОВ ДВУХ РАЗЛИЧНЫХ МАРОК В
ЛЮБЫХ КОЛИЧЕСТВАХ m_1 И m_2 С n ГРУППАМИ
НАГНЕТАТЕЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ РАЗНЫХ ДИАМЕТРОВ**

В результате решения биквадратного уравнения, составленного на основе ап-проксимации расходно-напорных рабочих характеристик центробежных насосов уравнением неполной квадратичной параболы, получена аналитическая зависимость по определению точного значения производительности насосной станции при параллельной работе центробежных насосов двух различных марок в любых количествах m_1 и m_2 совместно с n группами нагнетательных трубопроводов разных диаметров в любых количествах $n_1, \dots, n_j, \dots, n_n$.

Приведены численные примеры расчетов и их окончательные результаты при различных длинах нагнетательных трубопроводов и двух значениях геометрической высоты подачи жидкости. Полученные результаты проверены, при прочих равных условиях, методом последовательных приближений. Совпадение результатов идеальное.

Ключевые слова: центробежные насосы различных марок, нагнетательные трубопроводы разных диаметров, расходно-напорная характеристика центробежного насоса, составление и решение биквадратного уравнения, точное значение производительности насосной станции, аналитические зависимости.

Расходно-напорную характеристику $Q_H - H_H$ центробежного насоса аналитически можно описать уравнением полной квадратичной параболы [1-4]

$$H_H = a_0 + a_1 Q_H + a_2 Q_H^2, \quad (1)$$

где H_H и Q_H – соответственно напор, развиваемый насосом, и производительность насоса при любом режиме его работы ($Q_H \neq 0$), м и м³/с; a_0 – напор, развиваемый насосом, при $Q_H = 0$, м; a_1 и a_2 – постоянные, величины и знаки которых зависят от формы расходно-напорной характеристики насоса.

При выборе насоса рекомендуется пользоваться той частью его расходно-напорной характеристики $Q_H - H_H$, которая лежит в области высоких КПД [$\eta = (0,9 \dots 1)\eta_{\max}$]. Указанную область расходно-напорной характеристики всех центробежных насосов, подающих чистые жидкости, и большей части каналозационных насосов с достаточной для практических целей точностью аналитически можно представить уравнением неполной квадратичной параболы [2-7]

$$H_H = H_\Phi - S_\Phi Q_H^2, \quad (2)$$

где H_Φ – фиктивный напор насоса при $Q_H = 0$, м; S_Φ – фиктивное гидравличес-

кое сопротивление насоса, $(с/м^3)^2 \cdot м$; $h_{\Phi} = S_{\Phi} Q_H^2$ – фиктивная потеря напора в насосе при его производительности Q_H , м (рис.1).

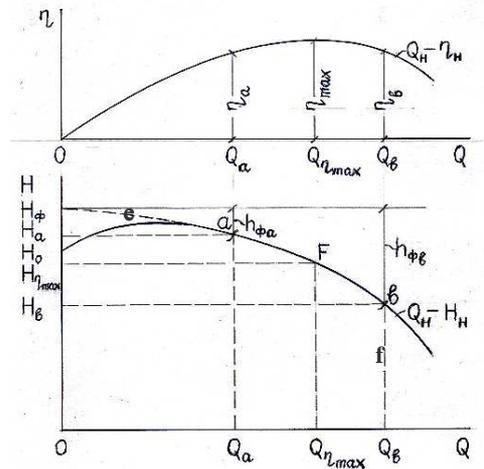


Рис. 1

Аналитические выражения оптимальной области расходно-напорных ха-рактеристик $Q_H - H_H$ двух центробежных насосов различных марок, согласно (2), запишутся в виде

$$\begin{cases} H_{H_1} = H_{\Phi_1} - S_{\Phi_1} Q_{H_1}^2, \\ H_{H_2} = H_{\Phi_2} - S_{\Phi_2} Q_{H_2}^2, \end{cases} \quad (3)$$

где H_{H_1} и H_{H_2} – напоры, развиваемые насосами, соответственно при подаче расходов жидкости Q_{H_1} и Q_{H_2} , м.

При параллельной работе центробежных насосов развиваемые ими на-поры равны. В случае параллельной работы двух центробежных насосов раз-личных марок будем иметь

$$H_{H_1} = H_{H_2} = H_H. \quad (4)$$

Поэтому производительность каждого из параллельно работающих цен-тробежных насосов двух различных марок, согласно (3) с учетом (4), опреде-лится зависимостями

$$\begin{cases} Q_{H_1} = \sqrt{(H_{\Phi_1} - H_H)/S_{\Phi_1}}, \\ Q_{H_2} = \sqrt{(H_{\Phi_2} - H_H)/S_{\Phi_2}}. \end{cases} \quad (5)$$

Суммарная производительность параллельно работающими центробеж-ных насосов двух различных марок в любых количествах m_1 и m_2 (производи-тельность насосной станции) определится уравнением (рис. 2)

$$Q_{HC} = Q_{A(m_1+m_2)} = m_1 Q_{H_1} + m_2 Q_{H_2} = m_1 \sqrt{\frac{H_{\Phi_1} - H_H}{S_{\Phi_1}}} + m_2 \sqrt{\frac{H_{\Phi_2} - H_H}{S_{\Phi_2}}}. \quad (6)$$

Возведя уравнение (6) два раза в квадрат, путем преобразований получим следующее биквадратное уравнение:

$$Q_{\text{НС}}^4 - 2Q_{\text{НС}}^2 (M - H_{\text{Н}}E) + (H_{\text{Н}}F - N)^2 = 0, \quad (7)$$

где приняты следующие обозначения:

$$\begin{aligned} M &= m_1^2 \frac{H_{\Phi_1}}{S_{\Phi_1}} + m_2^2 \frac{H_{\Phi_2}}{S_{\Phi_2}}; & E &= \frac{m_1^2}{S_{\Phi_1}} + \frac{m_2^2}{S_{\Phi_2}}; \\ N &= m_1^2 \frac{H_{\Phi_1}}{S_{\Phi_1}} - m_2^2 \frac{H_{\Phi_2}}{S_{\Phi_2}}; & F &= \frac{m_1^2}{S_{\Phi_1}} - \frac{m_2^2}{S_{\Phi_2}}. \end{aligned} \quad (8)$$

Суммарная расходно-напорная характеристика трубопроводов насосной станции $(\Sigma Q_{\text{НТ}} - H_{\text{T}})_n$ описывается уравнением [4-7]

$$H_{\text{T}} = H_{\text{Г}} + S_{\text{ТЭ}}(\Sigma Q_{\text{НТ}})^2. \quad (9)$$

Для режимной точки $A_{(m_1+m_2)}$ совместной работы системы насосы-трубо-проводы имеют место следующие равенства (рис. 2):

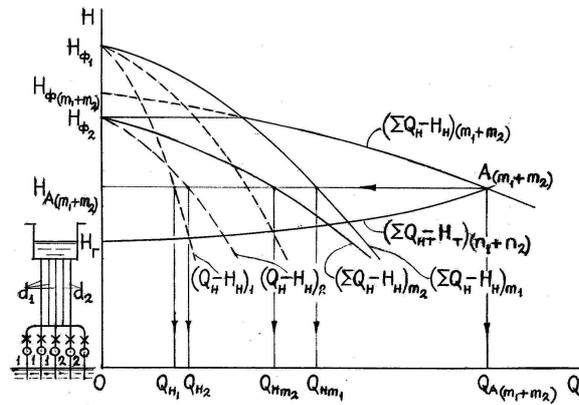


Рис. 2

$$\begin{cases} Q_{\text{НС}} = \Sigma Q_{\text{НТ}} = Q_{A_{(m_1+m_2)}}, \\ H_{\text{Н}} = H_{\text{T}} = H_{A_{(m_1+m_2)}}. \end{cases} \quad (10)$$

Поэтому уравнение (9) с учетом (10) можно представить в виде

$$H_{\text{Н}} = H_{\text{Г}} + S_{\text{ТЭ}} Q_{\text{НС}}^2, \quad (11)$$

где $H_{\text{Г}}$ – геометрическая высота подачи жидкости, равная разности отметок максимального уровня жидкости в верхнем и минимального ее уровня в нижнем резервуарах, м; $S_{\text{ТЭ}}$ – эквивалентное гидравлическое сопротивление всех трубопроводов водопроводящей системы насосной станции, $(\text{с}/\text{м}^3)^2 \cdot \text{м}$.

$$S_{\text{ТЭ}} = S_{\text{ТЭЭ}} + S_{\text{НТЭ}}, \quad (12)$$

$S_{\text{ТЭЭ}}$ – эквивалентное гидравлическое сопротивление всасывающих и нагнета-тельных, установленных внутри здания насосной станции, трубопроводов. При параллельной

работе центробежных насосов двух различных марок в любых количествах m_1 и m_2 будем иметь [5-7]

$$S_{ТЭЭ} = \left(\frac{m_1}{\sqrt{S_{ВТ(1)} + S'_{НТ(1)}}} + \frac{m_2}{\sqrt{S_{ВТ(2)} + S'_{НТ(2)}}} \right)^{-2}, \quad (13)$$

$S_{ВТ}$ и $S'_{НТ}$ – полное гидравлическое сопротивление соответственно всасывающего и нагнетательного, установленного внутри здания насосной станции, тру-бопроводов:

$$S_{ВТ} + S'_{НТ} = \left(\lambda_{ВТ} \frac{\ell_{ВТ}}{d_{ВТ}} + \Sigma \zeta_{МВТ} \right) / 2gA_{ВТ}^2 + \left(\lambda'_{НТ} \frac{\ell'_{НТ}}{d'_{НТ}} + \Sigma \zeta'_{МНТ} \right) / 2gA_{НТ}^2, \quad (14)$$

$S_{НТЭ}$ – эквивалентное гидравлическое сопротивление нагнетательных трубопроводов, установленных вне здания насосной станции. В случае n групп нагнетательных трубопроводов разных диаметров в любых количествах $n_1, \dots, n_j, \dots, n_n$ будем иметь [5-7]

$$S_{НТЭ} = \left(\sum_{j=1}^n \frac{n_j}{\sqrt{S_{НТ(j)}}} \right)^{-2}. \quad (15)$$

В случае, когда нагнетательные трубопроводы разных диаметров одиночны ($n_1 = \dots = n_j = \dots = n_n = 1$), из (15) получим

$$S_{НТЭ} = \left(\sum_{j=1}^n \frac{1}{\sqrt{S_{НТ(j)}}} \right)^{-2}. \quad (16)$$

При n нагнетательных трубопроводах одинаковых диаметров и длин ($S_{НТ(1)} = \dots = S_{НТ(j)} = \dots = S_{НТ(n)} = S_{НТ}$) из (16) имеем

$$S_{НТЭ} = S_{НТ} / n^2, \quad (17)$$

$S_{НТ(j)}$ и $S_{НТ}$ – полное гидравлическое сопротивление каждой из n ниток нагнетательных трубопроводов соответственно разных и одинаковых диаметров

$$S_{НТ} = aK_{НТ}S_{ОНТ}L_{НТ}, \quad (18)$$

$a = (1,05 \dots 1,10)$ – коэффициент, учитывающий суммарные местные гидравлические сопротивления; $K_{НТ}$ – поправочный коэффициент, учитывающий зону гидравлического сопротивления, где происходит движение жидкости: для зоны квадратичного сопротивления ($V_{НТ} \geq 1,2$ м/с) принимается $K_{НТ} = 1$, а для зоны докватратичного сопротивления ($V_{НТ} < 1,2$ м/с) определяется по таблице $K_{НТ} = f(V_{НТ})$; $S_{ОНТ}$ и $L_{НТ}$ – соответственно удельное гидравлическое сопротивление и длина нагнетательного трубопровода, установленного вне здания насосной станции, $(с/м^3)^2$ и $м$.

Подставляя выражение H_H из (11) в (7) и решая биквадратное уравнение, получим аналитическую зависимость по определению точного значения производительности насосной станции при параллельной работе центробежных насосов двух различных марок в любых количествах m_1 и m_2 совместно с n группами нагнетательных трубопроводов разных диаметров в любых количествах $n_1, \dots, n_j, \dots, n_n$:

$$Q_{HC} = \sqrt{(A + \sqrt{A^2 - BC})/B} , \quad (19)$$

где приняты следующие групповые обозначения:

$$\begin{cases} A = M - H_\Gamma (E + S_{TЭ} F^2) + S_{TЭ} FN , \\ B = 1 + 2S_{TЭ} E + S_{TЭ}^2 F^2 , \\ C = (H_\Gamma F - N)^2 . \end{cases} \quad (20)$$

При выводе аналитической зависимости по определению точного значения производительности насосной станции мы были вынуждены ограничиться рассмотрением параллельной работы центробежных насосов лишь двух различных марок. Дело в том, что при параллельной работе центробежных насосов m различных марок, расходно-напорные характеристики которых аналитически описываются зависимостью (2), уравнение их суммарной характеристики $(\Sigma Q_H - H_H)_m$ будет иметь порядок 2^m . Поэтому при параллельной работе центробежных насосов двух различных марок ($m=2$) уравнение их суммарной характеристики $(\Sigma Q_H - H_H)_m$ будет биквадратное, которое решается. При параллельной работе центробежных насосов более двух различных марок ($m>3$) порядок уравнений суммарной характеристики $(\Sigma Q_H - H_H)_m$ будет ≥ 8 , аналитическое решение которых невозможно.

Пользуясь приведенными в настоящей статье зависимостями, рассмотрены численные примеры по определению точного значения производительности насосной станции при параллельной работе центробежных насосов двух различных марок в количествах $m_1=3$ и $m_2=2$ совместно с двумя группами нагнетательных трубопроводов разных диаметров в количествах $n_1=3$ и $n_2=2$.

Ввиду ограниченности объема статьи, а также с целью упрощения расчета игнорированы полные гидравлические сопротивления всасывающего и нагнетательного, расположенного внутри здания насосной станции, трубопроводов ($S_{TЭ} = 0$), а также суммарные местные гидравлические сопротивления нагнетательного трубопровода, расположенного вне здания насосной станции ($a = 1$).

Сначала по таблице предельных расходов жидкости определены экономически целесообразные диаметры нагнетательных трубопроводов, установленных вне здания насосной станции, исходя из условия пропуска максимальных расходов жидкости оптимальных областей применения расходно-напорных характеристик $Q_H - H_H$ выбранных марок центробежных насосов.

Марки и параметры выбранных центробежных насосов и нагнетательных трубопроводов сведены в табл.1.

Таблица 1

№	Марка насоса		Количество насосов, m <i>штук</i>	Параметры насосов			Параметры нагн. труб.		
	нынешняя	прежняя		фиктивный напор, H_{Φ} <i>м</i>	фиктивное гидравлическое сопротивление, S_{Φ} <i>(с/л)².м</i>	предельные расходы оптимальной области, $Q_{оп-об}$ <i>л/с</i>	диаметр, d_{HT} <i>мм</i>	удельное гидравлическое сопротивление, $S_{ОНТ}$ <i>(с/м³)²</i>	количество ниток, n <i>штук</i>
1	Д 320-70	6 НДс	3	92,6	0,0033	60-92	300	0,9485	3
2	Д 500-65	10 Д-6	2	80,7	0,00084	111-167	400	0,2189	2

Затем определены гидравлические сопротивления вдоль нагнетательных трубопроводов при выбранных их диаметрах и различных длинах по зависимости (18), принимая в качестве первого приближения $K_{HT} = 1$. Например, при длине нагнетательных трубопроводов $L_{HT} = 500$ м и диаметрах труб $d_{HT_1} = 300$ мм и $d_{HT_2} = 400$ мм соответственно получим

$$S_{HT_1} = K_{HT} S_{ОНТ} L_{HT} = 1 \cdot 0,9485 \cdot 500 = 474,25 \text{ (с/м}^3\text{)}^2 \cdot \text{м}$$

и

$$S_{HT_2} = 1 \cdot 0,2189 \cdot 500 = 109,45 \text{ (с/м}^3\text{)}^2 \cdot \text{м}.$$

Результаты расчетов по определению гидравлических сопротивлений нагнетательных трубопроводов при их длинах $L_{HT} = 250 \dots 4000$ м сведены в табл.2.

Таблица 2

Параметры нагнетательных трубопроводов:		Гидравлическое сопротивление нагнетательных трубопроводов, $S_{HT}, \text{ (с/м}^3\text{)}^2 \cdot \text{м}$							
диаметр, d_{HT} <i>мм</i>	удельное гидравлическое сопротивление, $S_{ОНТ}$ <i>(с/м³)²</i>	при длине последних, $L_{HT}, \text{ м}$							
		250	500	750	1000	1500	2000	3000	4000
300	0,9485	237,125	474,25	711,375	948,5	1422,75	1897	2845,5	3794
400	0,2189	54,725	109,45	164,175	218,9	328,35	437,8	656,7	875,6

Выражение для определения эквивалентного гидравлического сопротивления двух групп нагнетательных трубопроводов разных диаметров, согласно (12) и (15) с учетом $S_{ТЭ} = 0$, запишется в виде

$$S_{ТЭ} \approx S_{НТЭ} = \left(\frac{n_1}{\sqrt{S_{НТ_1}}} + \frac{n_2}{\sqrt{S_{НТ_2}}} \right)^{-2} \quad (21)$$

Подставляя в (21) значения n_1 , n_2 и $S_{НТ_1}$, $S_{НТ_2}$, соответствующие длине нагнетательных трубопроводов $L_{НТ} = 500$ м (см. табл.1 и 2), получим

$$S_{ТЭ} \approx S_{НТЭ} = \left(\frac{3}{\sqrt{474,25}} + \frac{2}{\sqrt{109,45}} \right)^{-2} \approx 9,243 \text{ (с/м}^3\text{)}^2 \cdot \text{м.}$$

Результаты расчетов по определению эквивалентных гидравлических сопротивлений двух групп нагнетательных трубопроводов разных диаметров при их длинах $L_{НТ} = 250 \dots 4000$ м сведены в табл. 3.

Таблица 3

Эквивалентное гидравлическое сопротивление нагнетательных трубопроводов, $S_{ТЭ} \approx S_{НТЭ}$, $(\text{с/м}^3\text{)}^2 \cdot \text{м}$ при длине последних, $L_{НТ}$, м							
250	500	750	1000	1500	2000	3000	4000
4,621	9,243	13,864	18,485	27,728	36,970	55,456	73,941

Численные значения обозначений (8), согласно данным табл.1, будут

$$M = m_1^2 \cdot \frac{H_{\Phi_1}}{S_{\Phi_1}} + m_2^2 \cdot \frac{H_{\Phi_2}}{S_{\Phi_2}} = 3^2 \cdot \frac{92,6}{0,0033} + 2^2 \cdot \frac{80,7}{0,00084} = 636831,17 \text{ (л/с)}^2;$$

$$N = m_1^2 \cdot \frac{H_{\Phi_1}}{S_{\Phi_1}} - m_2^2 \cdot \frac{H_{\Phi_2}}{S_{\Phi_2}} = 3^2 \cdot \frac{92,6}{0,0033} - 2^2 \cdot \frac{80,7}{0,00084} = -131740,26 \text{ (л/с)}^2;$$

$$E = \frac{m_1^2}{S_{\Phi_1}} + \frac{m_2^2}{S_{\Phi_2}} = \frac{3^2}{0,0033} + \frac{2^2}{0,00084} = 7489,1775 \text{ (л/с)}^2/\text{м};$$

$$F = \frac{m_1^2}{S_{\Phi_1}} - \frac{m_2^2}{S_{\Phi_2}} = \frac{3^2}{0,0033} - \frac{2^2}{0,00084} = -2034,632 \text{ (л/с)}^2/\text{м}.$$

Численные значения групповых обозначений (20) при геометрической высоте подачи жидкости $H_{Г} = 45$ м и длине нагнетательных трубопроводов $L_{НТ} = 500$ м, имея в виду, что $(\text{с/м}^3\text{)}^2 \cdot \text{м} = 10^{-6} \text{ (л/с)}^2/\text{м}$, будут

$$A = M - H_{Г}(E + S_{ТЭ}F^2) + S_{ТЭ}FN =$$

$$= 636831,17 - 45[7489,1775 + 9,243 \cdot 10^{-6} \cdot (-2034,632)^2] + 9,243 \cdot 10^{-6} \cdot (-2034,632)(-131740,26) = 300573,82 \text{ (л/с)}^2;$$

$$B = 1 + 2S_{ТЭ} E + S_{ТЭ}^2 F^2 = 1 + 2 \cdot 9,243 \cdot 10^{-6} \cdot 7489,1775 + [9,243 \cdot 10^{-6} \cdot (-2034,632)]^2 = 1,1388;$$

$$C = (H_{Г} F - N)^2 = [45 \cdot (-2034,632) - (-131740,26)]^2 = 161457,86 \cdot 10^4 \text{ (л/с)}^4.$$

Подставляя соответствующие значения в (19), получим

$$Q_{НС} = \sqrt{(A + \sqrt{A^2 - BC})/B} = \sqrt{\frac{300573,82 + \sqrt{300573,82^2 - 1,1388 \cdot 161457,86 \cdot 10^4}}{1,1388}} = 724,694 \text{ л/с}.$$

Окончательные результаты расчетов по определению точных значений производительности насосной станции при параллельной работе центробежных насосов двух различных марок в количествах $m_1=3$ и $m_2=2$ совместно с нагнетательными трубопроводами двух групп разных диаметров в количествах $n_1=3$ и $n_2=2$, при различных их длинах $L_{НГ}=250 \dots 4000$ м и геометрической высоте подачи жидкости $H_{Г} = 45$ м и $H_{Г} = 65$ м, сведены в табл. 4.

Таблица 4

Геометрическая высота подачи жидкости, $H_{Г}$, м	Производительность насосной станции, $Q_{НС}$, л/с							
	при длине нагнетательных трубопроводов, $L_{НГ}$, м							
	250	500	750	1000	1500	2000	3000	4000
45	747,512	724,694	703,832	684,662	650,563	621,063	572,31	533,396
65	529,727	513,303	498,285	484,470	459,889	438,605	403,386	375,226

Приведенные в табл. 4 значения производительности насосной станции проверены методом последовательных приближений по зависимости (22), полученной из (6) с подстановкой в ней выражения $H_{Н}$ из (11):

$$Q_{НС} = m_1 \sqrt{\frac{H_{\Phi_1} - (H_{Г} + S_{ТЭ} Q_{НС}^2)}{S_{\Phi_1}}} + m_2 \sqrt{\frac{H_{\Phi_2} - (H_{Г} + S_{ТЭ} Q_{НС}^2)}{S_{\Phi_2}}}. \quad (22)$$

Совпадение значений, рассчитанных по зависимости (19), и значений, полученных, при прочих равных условиях, по зависимости (22), идеальное.

ВЫВОДЫ

1. Путем аппроксимации рабочих расходно-напорных характеристик $Q_{Н} - H_{Н}$ центробежных насосов уравнением неполной квадратичной параболы составлено биквадратное уравнение, решением которого получена аналитическая зависимость для определения

точного значения производительности насосной станции при параллельной работе центробежных насосов двух различных марок в любых количествах m_1 и m_2 совместно с n группами нагнетательных трубопроводов разных диаметров в любых количествах $p_1, \dots, p_j, \dots, P_n$.

2. Корректность полученной зависимости (19) с групповыми обозначениями (20) и (8) проверена, при прочих равных условиях, методом последовательных приближений по зависимости (22). Совпадение результатов идеальное.
3. Предложенные в работе зависимости могут быть применены при решении многих практических задач, представляющих частные случаи рассмотренной общей задачи.
4. Показан ход расчета численного примера по определению точного значения производительности насосной станции при параллельной работе центробежных насосов двух различных марок с нагнетательными трубопроводами при выбранных значениях m_1 , m_2 , p_1 и p_2 . Данный расчет может быть полезным как для инженеров соответствующих проектных организаций при разработке проектов систем водоснабжения и водоотведения, так и для студентов вузов по специальностям “Водоснабжение”, “Гидротехническое строительство” и “Гидромелиорация” при выполнении курсовых и дипломных проектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Прегер Е.А.** Аналитические зависимости между параметрами лопастных насосов // Научные труды ЛИСИ. – Л., 1955. – Вып. 20. – С. 59–75.
2. **Прегер Е.А.** Аналитический метод исследования совместной работы насосов и трубопроводов канализационных насосных станций // ЛИСИ. – Л., 1974. – 61 с.
3. **Ильин В.Г.** Расчет совместной работы насосов, водопроводных сетей и резервуаров. – Киев: Госстройиздат УССР, 1963. – 136 с.
4. **Хачатрян Р.М.** Определение коэффициента редукции производительности параллельно работающих одинаковых центробежных насосов // Исследования по гидро-технике и санитарной технике: Межвузовский тематический сборник научных трудов / ЕрПИ. – Ереван, 1984. – С. 64–70.
5. **Хачатрян Р.М.** Определение эквивалентного сопротивления трубопроводов насосной станции // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. – 1999. – Т. 52, № 3. – С. 410–414.
6. **Хачатрян Р.М.** Определение производительности насосной станции при параллельной работе m неодинаковых центробежных насосов с n одинаковыми нагнетательными трубопроводами // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. – 2001. – Т. 54, № 3. – С. 444–449.
7. **Хачатрян Р.М.** Определение производительности насосной станции при параллельной работе m групп неодинаковых центробежных насосов совместно с n группами неодинаковых нагнетательных трубопроводов // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. – 2005. – Т. 58, № 3. – С. 602–613.

ЕрГУАС. Материал поступил в редакцию 07.07.2006 .

Ռ. Մ. ԽԱՉԱՏՐՅԱՆ

**ՊՈՍՊԱԿԱՅԱՆԻ ԱՐՏԱԴՐՈՂԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՃՇԳՐԻՏ ԱՐԺԵՔԻ ՈՐՈՇՈՒՄԸ
ԵՐԿՈՒ ՏԱՐԲԵՐ ՄԱԿՆԻՇՆԵՐԻ ՑԱՆԿԱՑԱԾ m_1 ԵՎ m_2 ԹՎՈՎ
ԿԵՆՏՐՈՆԱԽՈՒՑՄ ՊՈՍՊԵՐԻ ԶՈՒԳԱՀԵՌ ԱՇԽԱՏԱՆՔԻ ԴԵՊՔՈՒՄ՝
 n ԽՈՒՄԲ ՏԱՐԲԵՐ ՏՐԱՄԱԳԾԵՐԻ ՄՂՄԱՆ ԽՈՂՈՎԱԿԱՇԱՐԵՐԻ ՀԵՏ**

Կենտրոնախույս պոմպերի ելքա-ճնշումային բանվորական բնութագրերի՝ ոչ-լրիվ քառակուսի պարաբոլի հավասարումով մոտարկման հիման վրա կազմված երկքառակուսի հավասարման լուծման արդյունքում ստացված է պոմպակայանի արտադրողականության ճշգրիտ արժեքը որոշելու վերլուծական առնչություն՝ երկու տարբեր մակնիշների ցանկացած m_1 և m_2 թվով կենտրոնախույս պոմպերի զուգահեռ աշխատանքի դեպքում՝ n խումբ տարբեր տրամագծերի ցանկացած $n_1, \dots, n_j, \dots, n_n$ խմբաբանակներով մղման խողովակաշարերի հետ համատեղ:

Բերված են թվային օրինակների հաշվարկներ և դրանց վերջնական արդյունքները՝ մղման խողովակաշարերի տարբեր երկարությունների և հեղուկի տրման երկրաչափական բարձրության երկու արժեքների դեպքում: Ստացված արդյունքները ստուգված են, այլ հա-վասար պայմաններում, աստիճանական մոտեցումների եղանակով: Արդյունքների համընկ-նումը իդեալական է:

Առանցքային բառեր. տարբեր մակնիշների կենտրոնախույս պոմպեր, տարբեր տրա-մագծերի մղման խողովակաշարեր, կենտրոնախույս պոմպի ելքա-ճնշումային բնութագիր, երկքառակուսի հավասարման կազմում և լուծում, պոմպակայանի արտադրողականության ճշգրիտ արժեք, վերլուծական առնչություններ:

R.M. KHACHATRYAN

**PRECISE VALUE DETERMINATION OF PUMPING STATION CAPACITY
IN CASE OF PARALLEL WORK OF CENTRIFUGAL PUMPS OF
TWO DIFFERENT TYPES AT ANY QUANTITY m_1 AND m_2 WITH n
GROUP DELIVERY PIPELINES OF DIFFERENT DIAMETERS**

As a result of biquadratic equation solution, composed on the basis of approximating the discharge-head characteristics of centrifugal pumps by quadratic non-perfect parabola equation, an analytical dependence for determining the precise value of pumping station capacity, in case of parallel work of centrifugal pumps of two different types at any quantity m_1 and m_2 with n group delivery pipelines of different diameters at any quantity $n_1, \dots, n_j, \dots, n_n$, is obtained.

The numerical calculation examples and final results for various length of delivery pipelines and two value of geometrical height delivery of liquid are given. The results obtained are verified, other conditions being equal, by the method of successive approximations. The coincidence of results are ideal.

Keywords: centrifugal pumps of different types, delivery pipelines of different diameters, characteristic discharge-head of centrifugal pump, composition and solution of biquadratic equation, the precise value of pumping station capacity, analytical dependences.

ԲՈՎԱՆԴԱԿՈՒԹՅՈՒՆ

**ՄԱՐԳՍՅԱՆ ՅՈՒԼԻ., ՓԱՐԻԿՅԱՆ Տ. Ֆ., ՍՏԵՓԱՆՅԱՆ Կ. Գ.,
ԽԱՌԱՏՅԱՆ Ա. Գ.**
ԶՈՒԳԱՀԵՌ՝ ՄԱՆԻՊՈՒԼՅԱՏՈՐՆԵՐԻ ՄՈՏԱՎՈՐ ՆԱԽԱԳԾՈՒՄ ԸՍՏ ԵԼՔԻ
ՕՂԱԿԻ ՈՉ ԼՐԻՎ ՈՐՈՇՎԱԾ ԴԻՐՔԵՐԻ 191

ԴՐԱՉԵՎ Օ.Ի., ՏԱՐԱՆԵՆԿՈ Գ.Վ., ՏԱՐԱՆԵՆԿՈ Վ.Ա., ՍՎԻՑ Ա.
ԽՈՐ ԱՆՑՔԵՐԻ ԹՐԹՈՒԱՄՇԱԿՄԱՆ ԱՐԴՅՈՒՆԱՎԵՏՈՒԹՅԱՆ
ԲԱՐՁՐԱՑՈՒՄԸ..... 201

ԱԲՈՑԱՆ Ա.Հ., ԴՐՄԵՅԱՆ Հ.Ռ., ՍԱՖԱՐՅԱՆ Տ.Ն.
ՆՅՈՒԹԵՐԻ ՀԱՄԱՍԵՌՈՒԹՅԱՆ ՀԵՏԱԶՈՏՄԱՆ ԻՆՏԵՐՖԵՐԱԶՈՓԱԿԱՆ
ՄԵԹՈԴՆԵՐ 210

**ՄԱՐՏԻՐՈՍՅԱՆ Վ.Հ., ԹՈՐՈՍՅԱՆ Գ.Հ., ՂՈՒԿԱՍՅԱՆ Ժ.Հ., ՉԻՏԱՆՅԱՆ Ա.Հ.,
ՍԱՍՈՒՆՅԱՆ Մ.Է.**
ՖԵՐՈՍԻԼԻԹՅՈՒՄԻ ՍՏԱՑՈՒՄԸ ՄԵՏԱԼՈՒՐԳԻԱԿԱՆ ԳՈՐԾԱՐԱՆՆԵՐԻ
ԹԱՓՈՆԱԽԱՐԱՄՆԵՐԻՑ 219

ԳԵՈՂԱԿՅԱՆ Զ.Ա.
ԹԱՂԱՆԹԱՅԻՆ ԷԼԵԿՏՐԱՏԱՔԱՑՈՒՑԻՉՆԵՐ
1. ՖՈՆՆԿՅՈՒՆԱԼ ԵՎ ԿԱՌՈՒՑՎԱԾՔԱՅԻՆ ԱՌԱՆՁՆԱՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐ
(ԱԿՆԱՐԿ) 228

**ԱՂԲԱԼՅԱՆ Ս.Գ., ՀՈՎՍԵՓՅԱՆ Ա.Հ., ԳՐԻԳՈՐՅԱՆ Ա.Ս.,
ԻՍՐԱՅԵԼՅԱՆ Ս.Մ., ՀԱՐՈՒԹՅՈՒՆՅԱՆ Ս.Ա.**
ՄՈԼԻԲԴԵՆԻ ԽՏԱՆՅՈՒԹԵՐԻՑ ՄՈԼԻԲԴԵՆԻ ԴԻՍԻԼԻՅԻԴԻ ՍՏԱՑՄԱՆ
ՏԵԽՆՈԼՈԳԻԱՅԻ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԸ 237

**ԽԱՉԱՏՐՅԱՆ Վ.Ս., ԲԱՂԱԼՅԱՆ Ն.Պ., ԹԱՄՐԱԶՅԱՆ Մ.Գ., ԽԱՉԱՏՐՅԱՆ Կ.Վ.,
ՄՆԱՅԱԿԱՆՅԱՆ Մ.Ա., ԳՐԻԳՈՐՅԱՆ Ս.Է., ՂՈՒԼՅԱՆ Ա.Գ.,
ԱՊՐՈՑԱՆ Ս.Ա.**
ԷԼԵԿՏՐԱԷՆԵՐԳԵՏԻԿԱԿԱՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳԻ ԿԱՅՈՒՆԱՑՎԱԾ ՌԵԺԻՄՆԵՐԻ
ՄԱԹԵՄԱՏԻԿԱԿԱՆ ՄՈՂԵԼՆԵՐԻ ԿԱՌՈՒՑՈՒՄԸ` ՀԱՇՎԻ ԱՌՆԵԼՈՎ
ՏՐԱՆՏՈՐՄԱՏՈՐՆԵՐԻ ՀԱՄԱԼԻՐ ՏՐԱՆՏՈՐՄԱՑԻՍՅԻ
ԳՈՐԾԱԿԻՑՆԵՐԸ..... 244

ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ Վ.Գ., ՀՈՎԱԿԻՄՅԱՆ Տ.Հ.
ՃԵՂՔԱՅԻՆ ԿԱՆԱԼԻ ՄԱԹԵՄԱՏԻԿԱԿԱՆ ՄՈՂԵԼ ԶԶԷՌ ՏԻՊԻ ԱՏՈՄԱՅԻՆ
ՌԵԱԿՏՈՐՆԵՐԻ ՋԵՐՄԱԿՐԻ ԱՐՏԱՀՈՍՔԻ ԱԽՏՈՐՈՇԻՉ ՀԱՄԱԿԱՐԳԵՐԻ
ՄՇԱԿՄԱՆ, ՉԱՓԱԲԵՐՄԱՆ ԵՎ ԹԵՍԹԱՎՈՐՄԱՆ ՀԱՄԱՐ 253

ՄԱՐԳՍՅԱՆ Վ.Հ.
ՌԱԴԻԱԼ ՑԱՆՅԵՐՈՒՄ ՀԱՄԱԼԻՐ ԲԵՌԻ ԲՆՈՒԹԱԳՐԵՐԻ
ԱԶԴԵՑՈՒԹՅՈՒՆԸ ՀԶՈՐՈՒԹՅԱՆ ԿՈՐՍԻ ՎՐԱ 262

ԱՌԱՔԵԼՅԱՆ Վ.Պ.
ԷԼԵԿՏՐԱՀԱՂՈՐԴՄԱՆ ԳԾԻ ՆՈՐ PTL-2 ՄԱԹԵՄԱՏԻԿԱԿԱՆ ՄՈՂԵԼԻ
ՀԶՈՐՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՀԱՎԱՍԱՐՈՒՄՆԵՐ..... 269

ՄԻՐԶԱԲԵԿՅԱՆ Ժ.Մ.
ԺԱՊԱՎԵՆԱՅԻՆ ՀՈՍԱՆՔԱՀԱՂՈՐԴԻՉ ԲԱՐՁՐԱՀԱՃԱԽԱԿԱՆ
ՄԱԼՈՒԽՆԵՐԻ ԷԼԵԿՏՐԱՄԱԳՆԻՍԱԿԱՆ ՀԱՇՎԱՐԿ 274

ՀԱԿՈՐԶԱՆՅԱՆ Գ.Դ. , ՄԱՏԱՐՅԱՆ Վ.Ս.	
ՇՂԹԱՅԱԿԱՆ ՍԽԵՄԱՆՆԵՐԻ ՄՈՒՏՔԱՅԻՆ ԴԻՄԱԴՐՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՈՐՈՇ ՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐ.....	283
ԱՐԲԱՆՍՅԱՆ Յ.Մ., ՄԱՐՏԻՐՈՍՅԱՆ Ս.Գ., ԳՅՈԶԱԼՅԱՆ Ս.Ս.	
A ^{IV} B ^{VI} ՊԻՆԴ ԼՈՒԾՈՒԹՅՆԵՐԻ ՀԻՄԱՆ ՎՐԱ ՋԵՐՄԱՅԻՆ ԸՆԴՈՒՆԻԶԻ ԵՎ ՆՐԱ ԱՍՏԻՃԱՆԱՎՈՐՄԱՆ ՀԱՄԱՐ ՋԵՐՄԱՅԻՆ ԱՂԲՅՈՒՐԻ ՄՇԱԿՈՒՄ.....	289
ԴԱՎԻԹՅԱՆ Ա.Ռ., ԲԵՐԲԵՐՅԱՆ Գ.Վ.	
ՑԱՄԱՔԱՅԻՆ ՕԲՅԵԿՏՆԵՐԻ ԻԿ ԼԱԶԵՐԱՅԻՆ ՏԵՍԱԾՐՄԱՆ ՀԱՄԱԿՅՎԱԾ ԴՅՈՒՐԱԿԻՐ ՀԱՄԱԿԱՐԳԻ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԸ.....	297
ԹԵՐԶՅԱՆ Հ.Ա., ՍՈՒՔԻԱՍՅԱՆ Հ.Ս., ՀԱԿՈՐԶԱՆ Ա.Է.	
ՎԵՐՋԱՎՈՐ ՏԱՐՐԵՐԻ ԵՂԱՆԱԿՈՎ ԵՌԱԶԱՓ ՄԱԳՆԻՍԱԿԱՆ ԴԱՇՏԵՐԻ ՀԱՇՎԱՐԿԻ ՎԵՐԱԲԵՐՅԱԼ.....	305
ՄԻՍՈՆՅԱՆ Ս.Հ., ԱՎԵՏԻՍՅԱՆ Ա.Գ., ՂԱԶԱՐՅԱՆ Դ.Ա.	
ԱՄՐԱԿԱՅՎԱԾ ԵԶՐԱՅԻՆ ՊԱՅՄԱՆՆԵՐՈՎ ԳԾԱՅԻՆ ԱՐԱԳԱԳՈՐԾՈՒԹՅԱՆ ԽՆԴԻՐՆԵՐԻ ԼՈՒԾՈՒՄԸ ԴԻՖԵՐԵՆՅԱԼ ՁԵՎԱՓՈԽՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՏԻՐՈՒՅԹՈՒՄ.....	318
ԽԱԶԱՏՐՅԱՆ Ռ. Ս.	
ՊՈՄՊԱԿԱՅԱՆԻ ԱՐՏԱԴՐՈՂԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՃՇԳՐԻՏ ԱՐԺԵՔԻ ՈՐՈՇՈՒՄԸ	
ԵՐԿՈՒ ՏԱՐԲԵՐ ՄԱԿՆԻՇՆԵՐԻ ՑԱՆԿԱՑԱԾ m ₁ ԵՎ m ₂ ԹՎՈՎ ԿԵՆՏՐՈՆԱԽՈՒԹՅ ՊՈՄՊԵՐԻ ԶՈՒԳԱՀԵՌ ԱՇԽԱՏԱՆՔԻ ԴԵՊՔՈՒՄ՝ n ԽՈՒՍԲ ՏԱՐԲԵՐ ՏՐԱՄԱԳԾԵՐԻ ՄՂՄԱՆ ԽՈՂՈՎԱԿԱՇԱՐԵՐԻ ՀԵՏ.....	331

СОДЕРЖАНИЕ

САРКИСЯН Ю.Л., ПАРИКЯН Т.Ф., СТЕПАНЯН К.Г., ХАРАТЯН А.Г. АППРОКСИМАЦИОННЫЙ СИНТЕЗ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ МАНИПУЛЯТОРОВ ПО НЕПОЛНОСТЬЮ ОПРЕДЕЛЕННЫМ ПОЛОЖЕНИЯМ ВЫХОДНОГО ЗВЕНА	191
ДРАЧЕВ О.И., ТАРАНЕНКО Г.В., ТАРАНЕНКО В.А., СВИЦЬ А. ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВИБРАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ ГЛУБОКИХ ОТВЕРСТИЙ	201
АБОЯН А.О., ДРМЕЯН Г.Р., САФАРЯН Т.Н. ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ОДНОРОДНОСТИ ВЕЩЕСТВ	210
МАРТИРОСЯН В.А., ТОРОСЯН Г.О., ГУКАСЯН Ж.Г., ЧИТАНЯН А.Г., САСУНЦЯН М.Э. ПОЛУЧЕНИЕ ФЕРРОСИЛИЦИЯ ИЗ ОТХОДОВ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИХ ЗАВОДОВ	219
ГЕОДАКЯН Д.А. ПЛЕНОЧНЫЕ ЭЛЕКТРОНАГРЕВАТЕЛИ 1. ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ И КОНСТРУКЦИОННЫЕ ОСОБЕННОСТИ (ОБЗОР)	228
АГБАЛЯН С.Г., ОВСЕПЯН А.О., ГРИГОРЯН А.С., ИСРАЕЛЯН С.М., АРУТЮНЯН С.А. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ДИСИЛИЦИДА МОЛИБДЕНА ИЗ МОЛИБДЕНИТОВОГО КОНЦЕНТРАТА	237
ХАЧАТРЯН В.С., БАДАЛЯН Н.П., ТАМРАЗЯН М.Г., ХАЧАТРЯН К.В., МНАЦАКАНЯН М.А., ГРИГОРЯН С.Э., ГУЛЯН А.Г., АПРОЯН С.А. УЧЕТ КОМПЛЕКСНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ТРАНСФОРМАЦИИ ТРАНСФОРМАТОРОВ ПРИ ПОСТРОЕНИИ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ УСТАНОВИВШИХСЯ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ	244
ПЕТРОСЯН В.Г., ОВАКИМЯН Т.О. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЩЕЛЕВОГО КАНАЛА ДЛЯ РАЗРАБОТКИ, КАЛИБРОВАНИЯ И ТЕСТИРОВАНИЯ СИСТЕМ ДИАГНОСТИКИ ТЕЧИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ АТОМНЫХ РЕАКТОРОВ ТИПА ВВЭР	253
САРКИСЯН В.О. ВЛИЯНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПЛЕКСНОЙ НАГРУЗКИ НА ПОТЕРИ МОЩНОСТИ В РАДИАЛЬНЫХ СЕТЯХ	262
АРАКЕЛЯН В.П. УРАВНЕНИЯ МОЩНОСТИ НОВОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РТЛ-2 ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ	269
МИРЗАБЕКЯН Ж.М. РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ КАБЕЛЕЙ С ЛЕНТОЧНЫМИ ТОКОПРОВОДЯЩИМИ ЖИЛАМИ	274

<i>АКОПДЖАНЫАН Г.Д. , САФАРЯН В.С.</i> НЕКОТОРЫЕ СВОЙСТВА ВХОДНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ ЦЕПНЫХ СХЕМ.....	283
<i>АБРАМЯН Ю.А., МАРТИРОСЯН С.Г., ГЁЗАЛЯН С.С.</i> РАЗРАБОТКА ПРИЕМНИКА ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ $A^{IV}B^{VI}$ И ИСТОЧНИКА ТЕПЛА ДЛЯ ГРАДУИРОВКИ.	289
<i>ДАВИДЯН А.Р., БЕРБЕРЯН Г.В.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ КОМБИНИРОВАННОЙ ПОРТАТИВНОЙ СИСТЕМЫ ИК ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ НАЗЕМНЫХ ОБЪЕКТОВ.....	297
<i>ТЕРЗЯН А.А., СУКИАСЯН Г.С., АКОПЯН А.Э.</i> К РАСЧЕТУ ТРЕХМЕРНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ.....	305
<i>СИМОНЯН С.О., АВETИСЯН А.Г., КАЗАРЯН Д.А.</i> РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ЛИНЕЙНОГО БЫСТРОДЕЙСТВИЯ С ЗАКРЕПЛЕННЫМИ КРАЕВЫМИ УСЛОВИЯМИ В ОБЛАСТИ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ.....	318
<i>ХАЧАТРЯН Р.М.</i> ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОЧНОГО ЗНАЧЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ НАСОСНОЙ СТАНЦИИ ПРИ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАБОТЕ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАСОСОВ ДВУХ РАЗЛИЧНЫХ МАРОК В ЛЮБЫХ КОЛИЧЕСТВАХ m_1 И m_2 С n ГРУППАМИ НАГНЕТАТЕЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ РАЗНЫХ ДИАМЕТРОВ.....	331

CONTENTS

<i>SARKISSYAN Y.L., PARIKYAN T.F., STEPANYAN K.G., KHARATYAN A.G.</i> APPROXIMATE SYNTHESIS OF PARALLEL MANIPULATORS ON OUTPUT LINK INCOMPLETELY SPECIFIED POSITIONS	191
<i>DRACHOV O.I., TARANENKO G.V., TARANENKO V.A., SWIC A.</i> VIBRATING EFFICIENCY INCREASE PROCESSING OF DEEP APERTURES..	201
<i>ABOYAN A.H., DRMEYAN H.R., SAFARYAN T.N.</i> INTERFEROMETRIC METHODS OF INVESTIGATING THE SUBSTANCE HOMOGENEITY.....	210
<i>MARTIROSYAN V.H., TOROSYAN G.H., GHOOKASYAN Zh.H., CHITANYAN A.H., SASUNTSYAN M.E.</i> OBTAINING FERROSILICIUM FROM METALLURGICAL PLANT WASTES	219
<i>GEODAKYAN J.A.</i> FILM ELECTRIC HEATERS 1. FUNCTIONAL AND CONSTRUCTIONAL FEATURES (REVIEW)	228
<i>AGHBALYAN S.G., HOVSEPYAN A.H., GRIGORYAN A.S., ISRAYELYAN S.M., HARUTYUNYAN S.A.</i> INVESTIGATION OF TECHNOLOGY FOR OBTAINING MOLYBDENUM DISILICIDE FROM MOLYBDENUM CONCENTRATES	237
<i>KHACHATRYAN V.S., BADALYAN N.P., TAMRAZYAN M.G., KHACHATRYAN K.V., MNATSAKANYAN M.A., GRIGORYAN S.E., GHULYAN A.G., APROYAN S.A.</i> TRANSFORMATION COMPLEX FACTORS ACCOUNT OF TRANSFORMERS AT CONSTRUCTION OF MATHEMATICAL MODELS OF THE ESTABLISHED MODES OF ELECTROPOWER SYSTEMS	244
<i>PETROSYAN V.G., HOVAKIMYAN T.H.</i> CRACK-OPENING CHANNEL OF MATHEMATICAL MODEL FOR TASKS OF DEVELOPING, CALIBRATING AND TESTING OF COOLANT LEAK DIAGNOSTICS SYSTEMS OF WWER-TYPE NUCLEAR REACTORS	253
<i>SARGSYAN V.H.</i> IMPACTS OF COMPLEX LOAD CHARACTERISTICS ON THE LOSSES OF POWER IN RADIAL NETWORKS	262
<i>ARAKELYAN V.P.</i> POWER EQUATIONS OF NEW PTL-2 MATHEMATICAL MODEL OF TRANSMISSION LINE.....	269
<i>MIRZABEKYAN Zh.M.</i> ELECTRIC CABLE PARAMETERS WITH CONDUCTING THREAD	274
<i>HAKOBJANYAN G.D. , SAFARYAN V.S.</i> SOME FEATURES OF CHAIN SCHEME INPUT RESISTANCES	283

ABRAHAMYAN YU.A., MARTIROSYAN S.G., GYOZALYAN S.S. DEVELOPMENT OF THERMAL RADIATION DETECTOR BASED ON A ^{IV} B ^{VI} SOLID SOLUTIONS AND THERMAL RADIATION SOURCE FOR CALIBRATION.....	289
DAVITYAN A.R., BERBERYAN G.V. INVESTIGATION OF A COMBINED PORTABLE IR SYSTEM FOR LASER SCANNING LAND-BASED OBJECT.....	297
TERZYAN H.A., SUKIASYAN H. S., HAKOBYAN A.E. ON COMPUTATION OF THREE-DIMENSIONAL MAGNETIC FIELDS BY FINITE-ELEMENT METHOD.....	305
SIMONYAN S.H., AVETISYAN A.G., GHAZARYAN D.A. SOLUTION OF LINEAR SPEED PROBLEMS WITH FIXED BOUNDARY CONDITIONS IN THE DOMAIN OF DIFFERENTIAL TRANSFORMATIONS.....	318
KHACHATRYAN R.M. PRECISE VALUE DETERMINATION OF PUMPING STATION CAPACITY IN CASE OF PARALLEL WORK OF CENTRIFUGAL PUMPS OF TWO DIFFERENT TYPES AT ANY QUANTITY m_1 AND m_2 WITH n GROUP DELIVERY PIPELINES OF DIFFERENT DIAMETERS.....	331